



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**ESTRATEGIAS DE MEJORAS EN LA OPERACIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE
LIXIVIADOS (PTL), EN LA ESTACIÓN DE TRANSFERENCIA DEL MUNICIPIO DE
SABANETA, ANTIOQUIA**

Autor(es)
Juan Esteban Garro García

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental
Medellín, Colombia
2020



Estrategias de mejoras en la operación de la Planta de Tratamiento de Lixiviados (PTL) en la estación de transferencia del Municipio de Sabaneta, Antioquia

Juan Esteban Garro García

Informe de práctica como requisito para optar al título de:
Ingeniería Ambiental

Asesores (a)

Elizabeth Ocampo Montoya - Ingeniera Ambiental
Juan Esteban Piedrahita Vera - Ingeniero Ambiental

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental
Medellín, Colombia
2020.

Estrategias de mejoras en la operación de la Planta de Tratamiento de Lixiviados (PTL) en la estación de transferencia del Municipio de Sabaneta, Antioquia

Resumen

La estación de transferencia de Interaseo S.A.S E.S.P se encuentra ubicada en el municipio de Sabaneta, en este lugar se hace el traspaso de los residuos sólidos domiciliarios a vehículos de gran capacidad, para ser transportados al relleno sanitario La Pradera y hacer su disposición final. Durante su actividad, se generan lixiviados producto de la compactación de dichos residuos en vehículos recolectores. Este lugar cuenta con una Planta de Tratamiento de Lixiviados (PTL), en la cual se tratan estos líquidos debido a la peligrosidad que pueden presentar para el medio ambiente y a la salud de la comunidad.

El presente estudio diagnosticó las fallas operacionales y ambientales que son ejecutadas en la PTL, asimismo se propusieron mejoras que dieran lugar al buen funcionamiento del tren de tratamiento. Para ello se estudiaron las unidades más críticas que describen a la planta, se determinaron procedimientos alternativos para mitigar eventos de contingencia y se generaron mapas de isoyetas para establecer la influencia de la precipitación en la zona de estudio.

Este trabajo partió de una investigación preliminar, entendiendo cada unidad de tratamiento y cómo es el funcionamiento general de la planta. Luego se hicieron visitas en campo para entender los procesos operativos y establecer si son técnicamente efectivos durante el tratamiento de los lixiviados. Posteriormente se recolectó información en un diario de campo para sustentar el por qué y para qué pensar en estrategias operacionales, de diseño y de buena gestión ambiental. Finalmente, se identificaron las problemáticas con una matriz de información, que evidenciara cada falla y a su vez se propusieron estrategias para su remediación. Por otro lado, con la ayuda de Sistemas de Información Geográfica y datos abiertos de precipitación, se construyó el mapa de isoyetas.

Se determinó que la planta presenta bajos rendimientos en la remoción de sólidos durante el tratamiento preliminar. Por eso, se recomienda implementar un desarenador y aumentar las frecuencias de limpieza en tanques y rejillas. También es necesario aumentar la capacidad de lecho de secado, de no ser así, los biosólidos llegarán al tratamiento terciario que funciona por filtración, ocasionando una colmatación rápida de las membranas que la conforman. Respecto al almacenamiento de sustancias químicas, resulta indispensable implementar obras civiles para aumentar el área y que sea acorde a la cantidad máxima de reactivos a almacenar. Por otro lado, la planta no cuenta con medidas de contingencia que den respuesta oportuna ante riesgos operacionales o naturales. Finalmente, la PTL se ve

obligada a tratar diariamente 21.53 m³ de agua lluvia, debido a la conexión de las redes hidráulicas que mezclan estas aguas con los lixiviados y generan un costo operativo adicional para su tratamiento de \$148.402 por m³.

Todo lo anterior sustenta la iniciativa de implementar medidas de optimización y mejoras en la planta de tratamiento, fundamentadas en una asistencia técnica, poniendo en marcha protocolos de contingencia y buenas prácticas operacionales. La siguiente etapa después de este planteamiento, estará asociada con la financiación para la ejecución, cumplimiento y puesta en marcha de la planta, teniendo en cuenta los cambios y nuevos diseños que fueron propuestos.

Introducción

Las aguas residuales no domésticas son generadas durante los procesos de fabricación, producción o transformación de la materia prima en el sector comercial o industrial. Lo anterior, implica que el agua adquiera concentraciones altas de cargas contaminantes, las cuales deben ser eliminadas a partir de plantas de tratamiento, concibiéndole características especiales y reduciendo el grado de peligrosidad (Rojas, 2012). Asimismo, estas plantas son el conjunto de sistemas y operaciones unitarias de tipo físico, químico o biológico, que de forma sistemática y de acuerdo a la combinación y naturaleza exacta del proceso, varía la función de cada unidad del tratamiento que conforma a la misma (Borja, 2014). Por lo general, el sector industrial cuenta con sistemas de tratamiento, los cuales depuran de las aguas residuales producto de su actividad, cualquier agente contaminante, evitando sanciones por parte de la autoridad ambiental a la hora de ser vertidas a un cauce principal.

Una estación de transferencia es un ejemplo de industria, cuya operación produce aguas residuales no domésticas o lixiviados. Este lugar es un centro donde se traspasan residuos sólidos domiciliarios contenidos en vehículos recolectores de menor capacidad a vehículos de transporte al granel (Decreto 920 de 2013, art. 2). Su fin es evitar varios recorridos de vehículos compactadores a lo largo de la ciudad para la disposición final, favoreciendo así, la movilidad y disminuyendo el consumo de combustible, las emisiones de gases de efecto invernadero y el derrame de escurridos (SOCYA, 2018). Por lo general, los carros compactadores durante los recorridos de recolección, almacenan lixiviados o líquidos percolados, los cuales varían en volumen, de acuerdo al tipo de residuo, forma de traspaso, nivel de degradación y clima (Colmenares - Santos, 2007). La formación de estos líquidos se debe a la compactación de la maquinaria pesada, haciendo liberar agua y sustancias orgánicas contenidos en el interior de los residuos sólidos (Espinosa et al, 2007). Estos lavan compuestos más contaminantes, convirtiéndose en una sustancia con características químicas y biológicas altamente tóxicas (Raco et al. 2013),

ocasionando impactos ambientales asociados con la contaminación de fuentes de agua superficial y subterránea, suelo, fauna y flora (Pablos et al. 2011).

Una medida para controlar estos fluidos, es a partir de Plantas de Tratamiento de Lixiviados (PTL). Este tipo de plantas deben ser diseñadas acertando en técnicas económicamente viables y adecuadas a las características que presentan los lixiviados, reduciendo sus concentraciones químicas, físicas y biológicas y dando lugar al cumplimiento de los valores máximos permisibles exigidos por la entidad regulatoria (Torres, 2016). Lo anterior, permite, además, que el sector productivo, adopte prácticas sostenibles y favorezca la integridad ambiental de los bienes y servicios, estimulando el uso sostenible de los recursos naturales (AMVA, 2018). Por otro lado, es necesario que la planta cuente con equipos y herramientas que aseguren un control y seguimiento de los líquidos generados, permitiendo alcanzar óptimos desempeños en la PTL. De esta forma, se garantiza una calidad en los vertimientos sobre el cuerpo de agua receptor, o en su defecto, permite hacer su aprovechamiento en actividades de reúso o recirculación, teniendo en cuenta que el agua de calidad es una materia prima crítica para la industria actual (Fernandez, 2010).

Ahora, en términos legales, en Colombia no existe una normatividad específica para el tratamiento de lixiviados. Esto último genera un sistema de gestión que solo se concentra en la depuración para reducir la concentración de los contaminantes por debajo de los límites fijados en la normatividad vigente (Resolución 631/2015) (Betancourt, 2012). En consecuencia, no contar con un manejo, tratamiento y disposición final adecuado, junto con una normatividad específica, podría generar efectos irreversibles en el medio ambiente.

El presente trabajo se enfoca en la Planta de Tratamiento de Lixiviados de la empresa Interaseo S.A.S. E.S.P, su interés radica debido a las fallas operativas que exhiben las unidades de tratamientos y a la ausencia de buenas prácticas ambientales y operativas durante el manejo de lixiviados. Por tanto, se ve la necesidad de plantear propuestas bajo un fundamento teórico y profesional, dando lugar a la optimización operacional y permitiendo, además, extrapolar y replicar esta información a nuevas plantas enfocadas al tratamiento de lixiviados. Con lo anterior, se tiene que el objetivo de este trabajo es realizar propuestas de mejoras en la PTL, a partir de medidas de optimización, implementación de obras civiles y gestión ambiental, garantizando una calidad en el efluente final.

Objetivo General: Proponer estrategias de buenas prácticas operativas en la Planta de Tratamiento de Lixiviados en la estación de transferencia, ubicada en el Municipio de Sabaneta.

Objetivos específicos:

1. Realizar un diagnóstico técnico de las unidades de tratamiento que conforman la PTL, partiendo de información general de las prácticas operacionales que se llevan a cabo durante el tratamiento de lixiviados y que den lugar al reconocimiento de las unidades más críticas que describen el tren de tratamiento.
2. Desarrollar una evaluación final de técnicas de aprovechamiento basada en la identificación de los subproductos generados y disposiciones realizadas durante el funcionamiento de la planta.
3. Establecer prácticas seguras que garanticen un manejo adecuado de las sustancias y productos químicos relacionados con la PTL en las actividades de almacenamiento, manipulación, trasvase o rotulación.
4. Proponer medidas de contingencia para la mitigación de riesgos y desarrollo de alternativas para las fallas operativas y ambientales asociados con el funcionamiento de la planta.

Marco Teórico

Generalidades de los lixiviados

Los lixiviados provenientes de los residuos domiciliarios, son el resultado de los líquidos percolados cuando se hace el proceso de compactación en los vehículos recolectores, liberando sustancias orgánicas e inorgánicas y favoreciendo así, la mezcla de diferentes compuestos (Espinosa et al, 2007). El volumen de estas sustancias varía según el tipo de residuo, nivel de degradación, forma de traspaso, clima e hidrología de la zona (Colmenares - Santos, 2007). Análogamente, la descomposición de la materia orgánica es intensa y en efecto, la emisión de olores ofensivos al ambiente es mayor también.

Características y composición de los lixiviados

Según la literatura existen numerosas referencias en cuanto a la composición de lixiviados clasificándolos de acuerdo a la edad (Tabla 1), para el presente alcance se considerarán de tipo jóvenes.

Tabla 1
Características generales de un lixiviado joven

Característica	Lixiviado joven
DBO	Muy alto
DQO	Muy alto
Amoniaco	Muy alto
Fósforo	Usualmente deficiente
pH	Muy bajo
Detergentes	Muy altos
Sales disueltas	Muy altos

Agentes incrustantes (Fe, Ca, Mg)
Metales pesados

Muy altas
Muy altos

Nota. Fuente: Tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios: avances recientes (Giraldo, 2011)

Los lixiviados jóvenes presentan alta concentración de sales disueltas y metales pesados, su pH es ácido y en consecuencia es mayor la corrosión en rejillas y bombas, especialmente, cuando son llevadas a un tren de tratamiento. Su aspecto, es por lo general de color oscuro, exhibe olores fuertes y penetrantes (Martínez, 2018). Se caracterizan por una biodegradabilidad alta, lo cual es conveniente debido a la degradación de una gran cantidad de microorganismos que están presentes en esta etapa. Una vez pasado los 5 años aproximadamente, la biodegradabilidad tiende a disminuir y por tanto la DBO y la DQO son bajos también. Estos líquidos percolados presentan un alto contenido de amoníaco debido a las reacciones en cadena obtenidas a partir del nitrógeno, generando incluso irritación en los ojos cuando su concentración es dominante (Torres et al. (2014)). Adicionalmente, presentan altas concentraciones de iones de calcio, hierro y magnesio, ocasionando taponamiento de tuberías o bombas debido a la presencia de agentes incrustantes (Giraldo, 2014).

A pesar de la variable composición que presentan los lixiviados, en teoría, deberían estar compuestos alrededor del 90% solo de materia orgánica, sin embargo, su composición llega incluso a tener metales pesados producto de la mala separación desde la fuente, siendo el mercurio, níquel y cobre, los principales metales que se encuentran por la presencia de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE) (Puerta, 2004). Asimismo, la composición de patógenos como virus, bacterias y hongos se evidencian también en su composición por la presencia de residuos sanitarios. Por otra parte, los residuos de construcción, productos de aseo, solventes, tintas, medicamentos, material orgánico y muchos más aportan reactivos, que, en conjunto con los residuos sanitarios y RAEE, generan reacciones químicas en cadena y dan lugar a una composición diferente en los líquidos percolados. De la anterior forma, los lixiviados se convierten en una sustancia con características químicas y biológicas altamente tóxicas (Raco et al. 2013), ocasionando impactos ambientales asociados con la contaminación de fuentes hídricas principalmente (Pablos et al. 2011). Por tanto, siempre será conveniente conocer los constituyentes y las concentraciones que los lixiviados puedan presentar, pues a partir de estos se da un paso esencial en el desarrollo de sistemas de gestión para su tratamiento, reconociendo los procedimientos más efectivos a la hora de remover contaminantes y reducir sus impactos al medio ambiente (Torres, 2016).

Normatividad para el tratamiento de lixiviados

En términos legales en Colombia no existe una normatividad específica para el tratamiento de lixiviados. Actualmente, la Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico en el título de Resolución CRA 720 del 2015, regula el marco tarifario de vertimiento y establece que uno de los parámetros para hacer el cobro

está enfocado en el cumplimiento de la remoción del nitrógeno, por eso este se convierte en una variable muy importante en la operación de una planta de tratamiento de lixiviados para ser removido eficazmente. En contraste, los lixiviados deben recibir un manejo y tratamiento adecuado de forma tal que no genere impactos al medio ambiente. Aun así, no contar con un marco legal definido puede generar un sistema de gestión que solo se concentra en la depuración para reducir la concentración de los contaminantes por debajo de los límites fijados en la normatividad vigente (Resolución 631/2015) (Betancourt, 2012). En consecuencia, no contar con un manejo, tratamiento y disposición final adecuado, junto con una normatividad específica, podría generar efectos irreversibles en el medio ambiente.

Tratamiento de los lixiviados

En la práctica, los métodos más utilizados en el tratamiento de los lixiviados son los mismos que se utilizan en las aguas residuales domésticas, teniendo en cuenta la mayor concentración y variabilidad de contaminantes que conforman a los líquidos percolados. Si bien, es complejo determinar cuál tratamiento es más conveniente utilizar, su aplicación varía de acuerdo a la caracterización del líquido, siendo los procesos de recirculación, físicos, químicos, y de micro y ultra filtración los procedimientos más utilizados (Patiño, 2007). Es importante tener en cuenta que a la hora de tratar los lixiviados, resulta factible hacer un control y monitoreo in situ de forma constante, teniendo en cuenta la variabilidad en los constituyentes que conforman a este líquido y que pueden afectar las rutinas operacionales cuando se va a remover los contaminantes. En consecuencia, hacer mediciones diarias mínimamente del pH, temperatura, conductividad y DBO, permitirán reconocer las dosis adecuadas de los reactivos para evitar un exceso o déficit de insumos químicos en las dosificaciones, que finalmente reducen la efectividad de remoción y generando resultados no esperados. (Méndez et al, 2010).

A continuación, se abarcará el marco teórico relacionado con las unidades de tratamiento y sus respectivos procesos y operaciones que actualmente conforman el tratamiento de lixiviados en la planta de tratamiento de Interaseo S.A.S. E.S.P ubicada en el municipio de Sabaneta. Se pretende resaltar los principios y aspectos más relevantes de cada técnica, con el fin de establecer el contexto en el que se desarrolla esta investigación y finalmente permitan contribuir al objetivo principal de este estudio.

Tratamiento preliminar

Consiste en preparar el lixiviado para el tratamiento posterior, es un proceso enteramente físico que permite eliminar material particulado e incluso residuos sólidos de gran tamaño proveniente de los desechos domiciliarios que, al ir lavando partículas, son arrastradas y combinadas con el líquido percolado (Torres, 2016). En el caso de una estación de transferencia, ocurre comúnmente este proceso, no solo por las basuras compactadas dentro de los vehículos compactadores, sino también

porque al hacer el traspaso de residuos a carros de mayor capacidad, es sucesible de que algunos desechos escapen y caigan fuera de este a las redes hidráulicas o ductos que conduzcan el agua al tren de tratamiento (Socya, 2018).

Entre las unidades que conforman al tratamiento preliminar, se tienen las rejillas y tanque cribado que permiten la retención de sólidos a partir de mallas de diferentes tamaños. El objetivo de estos es reducir la probabilidad de daños en los equipos mecánicos, incrustaciones en tuberías y depósitos constantes en los tanques de almacenamiento con los que cuenta la planta de tratamiento (Mendoza, 2009).

Tratamiento físico-químico

Es común que en los sistemas de tratamiento de lixiviados sean incorporados procesos físico-químicos debido a la elevada carga orgánica que pueden presentar. Estos sistemas consisten en la remoción de partículas suspendidas a partir de reacciones químicas entre el fluido y un coagulante que de forma controlada y en reactores adecuados, se logran reducir valores de la DBO_5 en el efluente del orden de 30 a 40 mg/l, eliminación de sólidos totales entre el 70 hasta 90% y algunos metales pesados (Santiago, 2002). Alcanzar los porcentajes de remoción anteriormente mencionados, depende en gran parte del tipo de coagulante que es adicionado y para conseguir eso es necesario garantizar una relación entre el reactivo y las características fisicoquímicas del líquido lixiviado. La alcalinidad, el pH, concentración de sólidos suspendidos, carga eléctrica de las partículas suspendidas y la forma de agregación del coagulante, son algunas de las características más relevantes para obtener resultados esperados (Méndez, et al 2004).

El método físico-químico con adición de coagulantes involucra conjuntamente los siguientes procesos (Méndez et al 2004) y (Pérez, 2019):

Coagulación: Momento justo cuando se encuentra el químico coagulante con el agua a tratar, esta se da en una mezcla rápida.

Floculación: Ocurre en una mezcla lenta entre el agua y el coagulante. Se propicia el espacio adecuado para aglomerarse las partículas coloidales. La forma cilíndrica que presenta el tanque floculador, permite que la velocidad del agua vaya disminuyendo continuamente a medida que el agua ascienda, dando lugar a gradientes bajos cuando se llega a la zona recta de volumen constante.

Sedimentación: Se presenta a velocidades muy bajas, cuando el agua está completamente floculada, es decir con todos los coloides ya agrupados en partículas de mayor tamaño y peso (flóculos). Estos empiezan a precipitar y arrastran consigo flóculos de menor tamaño que están ascendiendo.

Filtración: Todo el material coloidal en forma de lodo y ya sedimentado, se dispone en lechos de secados con el fin de reducir la humedad y obtener así, subproductos deshidratados. Este biosólido según la caracterización, puede ser aprovechado,

siendo incorporado en el ciclo económico, sin embargo, por lo general presentan un alto contenido de patógenos, por lo que requiere su estabilización.

Reactivos químicos utilizados en el tratamiento físico-químico

En la PTL se utiliza como coagulante el Policloruro de Aluminio (PAC), el cual aporta iones de Aluminio (Al^{+++}) para formar el Hidróxido de Aluminio ($Al(OH)_3$), este producto es el encargado de agrupar y sedimentar los coloides causantes de la turbiedad y el color en los lixiviados. En general se tiene que, de la variedad de coagulantes, el PAC es el más recomendable, ya que aparte de ser muy eficaz, resulta rentable (Hernández et al. 2013). Sin embargo, la coagulación resulta efectiva solo cuando el pH es muy alto (entre 6 a 9) y si esto no se cumple, puede bajar la remoción de sustancias orgánicas en el agua. Análogamente, la adición de CAL hidratada permite ajustar el pH, ablandar el agua, eliminar turbiedad, impurezas y neutralizar los ácidos presentes (Hernández et al. 2013).

Parámetros físicos que afectan el proceso de coagulación

Según un estudio realizado sobre la evaluación de plantas de tecnología apropiada, se describen los siguientes parámetros físicos que afectan directamente la eficiencia y acción conjunta del coagulante y CAL sobre los lixiviados (Vargas, 2004):

Naturaleza del agua: Las partículas coloidales de diámetro pequeño ($< 10 \mu m$) son las que le dan color al agua y los valores del pH óptimo para ser removidas están entre 3.5 a 6. Por otro lado, las partículas de mayor diámetro, sean coloidales o no, son las que aportan la turbiedad y el rango de mejor eficiencia para su remoción está cerca a la neutralidad, es decir, entre 6 a 7.5. En los lixiviados, al igual que en las aguas residuales, existe una gran dispersión de tamaños de partículas, por tanto, los valores óptimos de pH para alcanzar una buena dosificación son intermedios y pueden variar. En efecto, es importante contar con un coagulante que se ajuste eficazmente a las características del agua previo a su tratamiento.

Forma de dosificación: Debe ser de forma constante y uniforme en la unidad de mezcla rápida (coagulación), permitiendo que el coagulante sea completamente dispersado y mezclado con el lixiviado.

Gradiente de velocidad: Cuanto mayor es el gradiente de velocidad, más rápida es la aglomeración de las partículas. Los valores más recomendados de gradientes de velocidad para la floculación se encuentran dentro de un rango de 10 a 100 s^{-1} .

Temperatura de agua: Una disminución de la temperatura del agua en una unidad de decantación conlleva a un aumento de su viscosidad, esto explica las dificultades que podría presentar la sedimentación de un floc en el tanque de floculación.

Tiempo de floculación: Mediante ensayos de prueba de jarras, se puede determinar este tiempo. La permanencia del agua en el floculador durante un tiempo inferior o superior al óptimo produce resultados inferiores a los deseados.

Cantidad del coagulante: Poca cantidad del coagulante no neutraliza totalmente la carga de la partícula, la formación de los microflóculos es muy escaso y por tanto la

turbiedad residual es elevada. Mientras que una alta cantidad de coagulante produce la inversión de la carga de la partícula y conduce a la formación de gran cantidad de microfloculos con tamaños muy pequeños cuyas velocidades de sedimentación son muy bajas, en efecto, la turbiedad es igualmente elevada.

Tratamiento por filtración

Los métodos por filtración consisten en la separación de sólidos a través de un material poroso, reteniendo las partículas a medida que el fluido pasa a presión o gravedad por medio de este (Solano,2014). Esta separación física es más eficaz cuando más fino es el tamaño del poro. Los sistemas que funcionan bajo el principio anterior, presentan colmataciones continuas producto de las partículas que quedan atrapadas en los poros. En efecto, es fundamental hacer retrolavados, que permitan remover la acumulación de sólidos que ocasionan el taponamiento (García, 2018). A continuación, se describen los métodos utilizados en la PTL:

Filtros de zeolita: La zeolita o silicato de aluminio son estructuras tridimensionales, se caracteriza por retener y liberar agua e intercambiar cationes sin modificar su estructura atómica. Tienen la capacidad de filtrar partículas por debajo de 5 micras gracias a los macro poros que la conforman. Además, la rugosidad y porosidad del medio filtrante permite remover gran parte de los sedimentos contenidos en el agua, amonio y fosfatos, dándole al agua una mayor claridad y reducción de la acidez (Pérez, 2019).

Filtros de carbón activado: Los filtros de carbón activado son una excelente superficie de filtración, permitiendo tener una gran capacidad de absorción a las impurezas del agua. El carbón activado puede retener solventes, pesticidas, residuos industriales y aquellos que generan olores en el agua. A pesar de ser un método muy efectivo, requiere de costos de operación altos y mano de obra calificada para manipularlo (Pérez, 2019).

Microfiltración: A partir de un sistema a presión el agua fluye por el centro de los cartuchos que componen a la microfiltración, obligando al fluido a pasar por poros de 5 micras y quedando retenidas las partículas en suspensión, por ejemplo, bacterias, macromoléculas, coloides y otros (Pérez, 2019).

Ultrafiltración: Permiten la separación de solutos con pesos moleculares mayores al medio filtrante. Esta unidad de tratamiento elimina partículas suspendidas, coloides, quistes, virus, endotoxinas y demás agentes no deseados en la constitución del agua lixiviada. Por lo general, las membranas de la ultrafiltración se encuentran a una luz de paso entre 0.1 y 0.01 micras, creando una separación de partículas diminutas (Pérez, 2019). Entre las ventajas de implementar la ultrafiltración es el bajo costo energético, las membranas poseen mayor vida útil debido a que poseen un sistema de limpieza mediante retrolavado y es oportuno

cuando es considerada como un tratamiento previo al osmosis inversa (García, 2018).

Osmosis inversa: Funciona bajo el mismo principio de la ultrafiltración, presentando una fuerza de presión generada por el agua y mayor a la presión osmótica. Gracias a su fino tamaño en el poro (entre 5-20 Å), permite retener no solo macromoléculas y coloides, sino también iones de pequeño tamaño. Lo anterior, garantiza una reducción en la salinidad y DQO hasta del 99.8%. A pesar que la calidad del agua una vez pasa por la osmosis es alta, esta unidad de tratamiento presenta costos de operación alto.

Mapa de isoyetas

Un mapa de isoyetas, son isolíneas que une los puntos en un plano cartográfico y representan la misma precipitación en la unidad de tiempo considerada (Becerra, 2006). Obtener esta representación, implica metodologías de interpolación espacial para predecir el valor de un atributo en una localidad precisa, considerando valores obtenidos de puntos vecinos. La literatura describe diferentes métodos de interpolación. Estos se clasifican en globales y locales, de acuerdo a la cantidad de información que utilizan, y en exactos e inexactos, de acuerdo al valor de las estimaciones respecto a los datos de origen (Tabla 3).

Tabla 2
Métodos de interpolación especial

Método	Global/Local	Tipo de interpolación
Clasificación	Global/local	Inexacta
Superficies de tendencia	Global	Inexacta
Modelos de regresión	Global refinamiento local	Inexacta
Polígonos de Thiessen	Local	Exacta
Interpolación lineal	Local	Exacta
Kriging	Local, pero con variación global	Exacta
Inverso de la distancia y medias móviles	Local	Inexacta cuando se aplica un suavizado de la superficie interpolada

Nota. Fuente: Adaptado. Modelación hidrológica empleado isoyetas de relieve, una aproximación geoestadística (Becerra, Gutiérrez, 2006).

Almacenamiento de cuarto de químicos

Según el ministerio de salud, un almacenamiento es el proceso donde se clasifican los productos químicos de manera segura y de acuerdo a las características propias del mismo, ya sea por su peligrosidad, reactividad, inflamabilidad o la mezcla de estos.

Por otro lado, el Sistema Globalmente Armonizado (SGA) es una guía que permite la

efectiva clasificación y etiquetado de productos químicos, buscando a nivel mundial que los productores y consumidores dispongan de información sobre los peligros químicos de una forma armonizada y comprensible, en etiquetas y en fichas de datos de seguridad (FDS) (Minambiente, 2016).

Algunas definiciones pertinentes para el presente estudio y considerando el marco conceptual del SGA son las siguientes:

Etiqueta: Elementos de información escritos, impresos o gráficos de una sustancia peligrosa, que se adhiere al recipiente que contiene el producto.

Ficha Técnica: Documento en el que se consignan las propiedades fisicoquímicas, características relevantes de una sustancia o producto y concentraciones adecuadas de uso de acuerdo al fin comercial del producto

Ficha de seguridad (FDS): Documento que describe los riesgos de un material peligroso y suministra información sobre cómo se puede manipular, usar y almacenar el material, de acuerdo a lo determinado por la NTC 4435, anexo N°2.

Incompatibilidad: Es la condición que alcanza los materiales peligrosos cuando puestas en contacto, puedan sufrir alteraciones de las características físicas o químicas originales, con riesgo de provocar explosión, desprendimiento de llamas o calor, formación de mezclas, vapores o gases peligrosos, entre otros.

Matriz de Compatibilidad: Es una guía para almacenar productos químicos de manera segura, en especial en lugares muy estrechos.

Palabra de advertencia: Indica la gravedad o el grado relativo del peligro de la sustancia química. Según el SGA, se usan principalmente la palabra “Peligro” y “Atención”.

Pictograma: Es una imagen con un símbolo de advertencia con el fin de informar el daño que una determinada sustancia o mezcla puede provocar a la salud o medio ambiente.

Metodología

Los pasos que describen con detalle las acciones requeridas para cumplir los objetivos específicos y en consecuencia con el objetivo general se definen en las siguientes etapas:

-Investigación sobre las unidades de tratamiento que conforman a la planta de tratamiento de lixiviados (PTL)

En primera instancia se hizo un bosquejo de la planta de tratamiento a partir de la información obtenida desde el manual operativo. En este esquema se plasmó las dosificaciones implementadas y los volúmenes máximos de almacenamiento con los que contaban algunas unidades de tratamiento (Figura 1).

Luego se procedió a realizar una investigación literaria sobre cada unidad que conformaba la planta de lixiviado, entendiendo en un principio el funcionamiento, la viabilidad operativa y la capacidad de remoción de los diferentes contaminantes que constituyen a los lixiviados. Lo anterior, se hizo con el fin de contextualizar los aspectos más relevantes en cada técnica de tratamiento y contrastar con la información obtenida en campo.

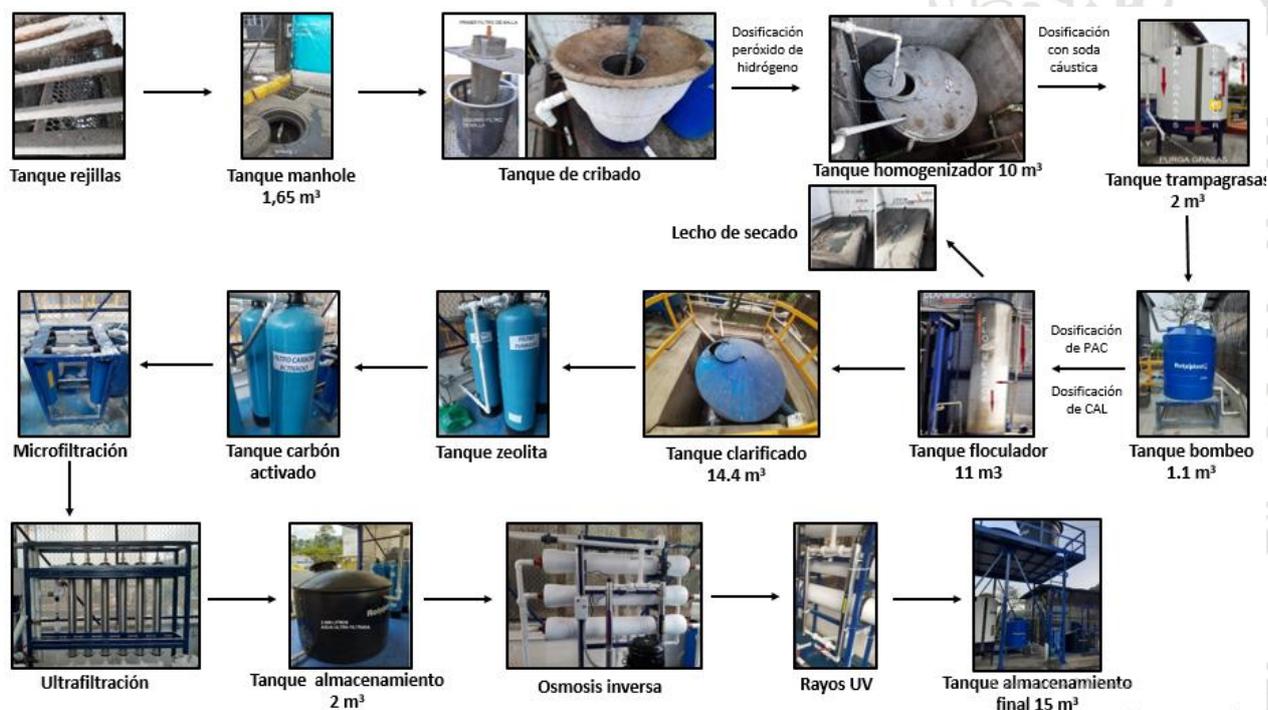


Figura 1. Tren de tratamiento de la planta de lixiviados. Se muestra los sistemas físicos y químicos de forma secuencial. Adaptado de planta de tratamiento de lixiviados ubicada en la Estación de Transferencia (Pérez, 2019)

-Visitas a las instalaciones de la Planta de Tratamiento de Lixiviados (PTL)

Debido a la poca información que se contaba para reconocer las unidades de tratamiento que conformaban a la planta, fue necesario visitarla en diferentes ocasiones para entender los procesos operativos y establecer si son técnicamente efectivos o no durante el tratamiento de los lixiviados. Con esto, se logra hacer una evaluación preliminar de la planta de tratamiento, determinando las condiciones actuales de la misma.

Las visitas en campo permitieron determinar los aspectos deficientes del sistema de tratamiento, a partir de una comparación entre las condiciones que fueron halladas por medio de la observación, el detalle y la información provista por el operador y los fundamentos teóricos y conceptuales hallados en la literaria. Asimismo, estas visitas dieron lugar a encontrar información respecto al funcionamiento general de la planta, reconociendo las frecuencias operacionales, periodos y procedimientos para el mantenimiento de las unidades que la conforman.

-Recolección de información

La información para sustentar el por qué y para qué pensar en estrategias operacionales, de diseño y de buena gestión ambiental fue recolectada a partir de un diario de campo. Este último constaba de los aspectos más relevantes ocurridos en los días operativos de la planta, evidencias fotográficas y algunas conclusiones u observaciones pertinentes luego de la descripción. Análogamente, si era necesario se adjuntaban documentos corporativos, literarios o archivos personales que sostuvieran las ideas plasmadas y ampliaran un poco más la información.

Entre la información recolectada, se pudo depurar gran parte de esta ya que no era trascendental o en su defecto, se desviaba un poco del objetivo general. Por tanto, se seleccionó una lista con los temas más relevantes que permitieron reconocer el motivo de las fallas en la planta de tratamiento y en su defecto ayudaron a determinar las propuestas de mejoras en el lugar.

-Identificación de problemáticas

Se desarrollaron puntos críticos debido a la operación o unidad de tratamiento que afectan de forma directa o indirecta en el funcionamiento normal de la planta. Para ello, se planteó hacer un diagrama de flujo o matriz de información que evidencie cada falla y a su vez se proponga una medida correctiva a la misma, resaltando entre ellas cual o cuales es de mayor priorización implementar.

Por otro lado, se determinaron los riesgos y aspectos asociados a la manipulación de las sustancias químicas durante su almacenamiento. Para ello, se realizaron inspecciones periódicas en el cuarto de químicos, observado cómo era el acopio de las sustancias y verificando el cumplimiento según la matriz de compatibilidad. Adicionalmente, se hizo un diagnóstico de las herramientas utilizadas para atender accidentes e incidentes, debido a las reacciones inducidas o esporádicas que pudieran tener las sustancias manejadas en la planta, esto último, basándose en los requerimientos establecidos según la Norma Técnica Colombia 4702, 4435, 1480 y 1461.

También se hizo un seguimiento a las prácticas relacionadas con el manejo de reactivos químicos a la hora de dosificar el agua lixiviada. Se tuvo en cuenta las formas de despacho, etiquetado y uso que pudieran contribuir a una incorrecta gestión y malas condiciones de higiene, seguridad, salud y ambiente.

Por último, se identificaron los riesgos más significativos que se pueden ocasionar durante la operatividad normal de la planta, por influencia de factores antrópicos o naturales. Lo anterior, permitió elaborar medidas de contingencia para detallar las

acciones de prevención y atención oportuna y mitigar la ocurrencia de algún evento que represente una amenaza en la planta.

-Identificación de subproductos y disposiciones finales

Se busca reconocer cuales son los principales subproductos generados durante la operación de la PTL, entendiendo cómo se generan, donde se disponen y bajo qué circunstancias se presenta mayor o menor cantidad de los mismos. Esto es con el fin de entender hasta qué punto es su vida útil y cómo pueden ser reincorporados en el ciclo económico. Para ello, se hizo un seguimiento desde el lugar donde son generados hasta su disposición final, reconociendo al mismo tiempo, la normatividad que ampara a los residuos generados y si estos requieren de una desactivación previa o no para su disposición o aprovechamiento.

-Planteamiento de estrategias

Se determinan las medidas que deben ser implementadas para las propuestas de mejoras operacionales, técnicas y estructurales, teniendo en cuenta la relación de costo-beneficio y así optimizar y mejorar el desempeño actual del tratamiento. Cada planteamiento expuesto se fundamenta con la información obtenida en los ítems anteriormente mencionadas y en la revisión bibliográfica debidamente referenciada.

-Implementación de Sistemas de Información Geografía (SIG)

Con la ayuda de Sistemas de Información Geográfica y con el historial de datos provistos por el Programa Integral Red de Agua (PIRAGUA), se construyó el mapa de isoyetas. Para ello, se tuvo en cuenta las precipitaciones diarias ocurridas entre enero del 2015 hasta marzo del 2020 en los municipios de Caldas, Sabaneta y La Estrella. Luego, de un procesamiento previo de la información y a partir de técnicas de interpolación lineal, se logró identificar la cantidad de agua que llueve sobre la estación de transferencia.

Resultados y análisis

Antes que todo, se resalta que una de las limitaciones que impidieron un estudio más preciso y enfocado al siguiente análisis, tuvo que ver con la falta de equipos y herramientas que dieran lugar a la medición de parámetros in situ, monitoreos y caracterizaciones para control del agua. Además, la falta de legislación sobre el tratamiento de los lixiviados no permitió hacer una matriz legal y listas de chequeo que dieran lugar a un cumplimiento efectivo de las obras y actividades en relación con la planta. En consecuencia, la anterior información, limita el alcance del proyecto solo a un planteamiento de buena práctica operacional, pues se desconoce el efecto real de las propuestas planteadas sobre el tratamiento de los lixiviados.

Ahora, entre los resultados obtenidos, se detectaron diferentes fallas relacionadas con el funcionamiento de la PTL. También se reconocieron algunos incumplimientos y ausencias de buenas prácticas ambientales y operaciones durante el manejo de la misma. A cada uno de los resultados se les hizo un diagnóstico y se propusieron alternativas de mejora.

Previo a lo anterior, se hace una breve contextualización y estudio sobre las características geográficas y climatológicas que describen a la estación de transferencia y a partir de esto, determinar cómo influye en la operación normal de la planta, los eventos de precipitación.



Figura 2. Localización de la Planta de Tratamiento de Lixiviados. El punto rojo indica la ubicación de la PTL y el polígono blanco representa el área de la estación de transferencia. Adaptado de Google Earth

Ubicación

La Planta de Tratamiento de Lixiviados se encuentra ubicada en el Municipio de Sabaneta, Antioquia, en la vereda Pan de Azúcar, a 2 kilómetros de la concesión del Pacífico (Variante de Caldas) en el sentido norte-sur. El terreno hace parte de la fundación Socya, pero este presta el servicio a Interaseo S.A.S E.S.P para llevar a cabo en dicho lugar, la actividad de transferencia de residuos sólidos y tratado de aguas lixiviadas.

Climatología

La Estación de Transferencia se encuentra justo en la división geográfica que limita a los municipios de La Estrella y Sabaneta, en efecto, la climatología de dicha estación tiende a ser muy similar a la de ambos territorios. Presenta temperaturas

máximas de 25°C y mínimas de 14 °C, las precipitaciones anuales en promedio son de 1566 mm/año y tiene una altura sobre el nivel del mar un poco mayor a los 1600 m. (PIRAGUA, 2020) Asimismo, según el IDEAM, esta región presenta un dominio importante de precipitaciones durante todo el año, marcadas principalmente en los meses de marzo hasta diciembre.

Influencia de la precipitación sobre la zona de estudio

Se quiere conocer mediante un análisis de mapa de isoyetas, el costo por m³ generado, cuando hay influencia de eventos de lluvia sobre la estación de transferencia. Lo anterior, debido a la conexión de los canales hidráulicos de aguas lluvias y lixiviados que llegan directo a la zona de almacenamiento, zona en la cual inicia el tren de tratamiento de la PTL.

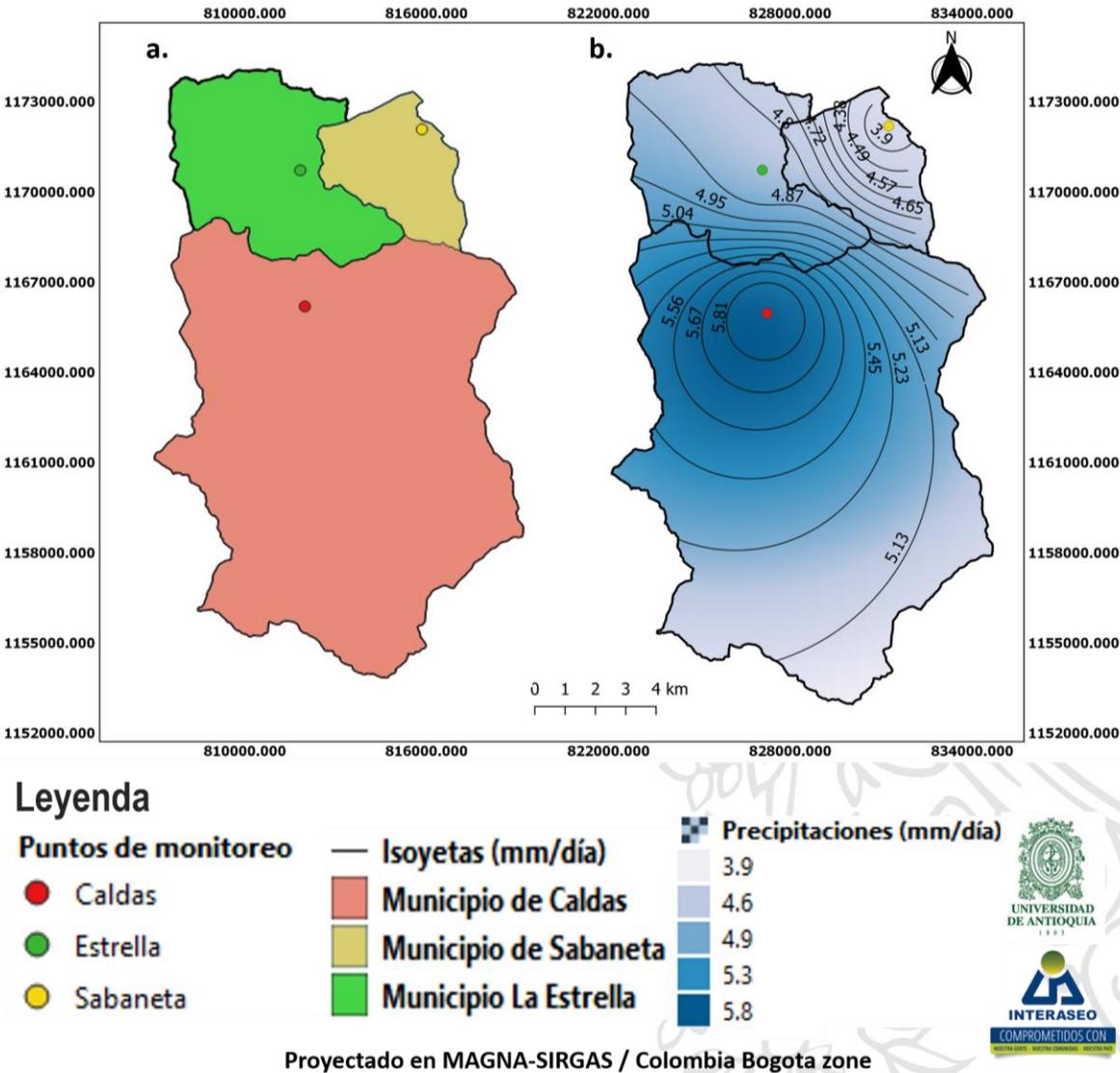


Figura 3. Representación espacial de los municipios de Caldas, La Estrella y Sabaneta. Figura 3a. Ubicación de los puntos de monitoreo Piragua en cada municipio. Figura 3b. Mapa de isoyetas entre los municipios de Caldas, La Estrella y Sabaneta. (Fuente propia).

De la figura 3a, se resalta que fue necesario considerar los tres puntos de monitoreo de los tres municipios cercanos a la estación de transferencia (Caldas, Sabaneta y La Estrella), con el fin de hacer una interpolación lineal y conocer a partir de valores obtenidos por los puntos vecinos, la cantidad de agua diaria que cae sobre dicha estación. En cuanto a la figura 3b, representa el resultado de la interpolación lineal, encontrando que en promedio las precipitaciones máximas en toda la región interpolada son de 5.8 mm/día y mínimas de 3.9 mm/día. Estos valores, a pesar que son aproximaciones, se pueden considerar muy cercanos a la realidad, ya que, según el método de interpolación lineal, su alcance es exacto cuando se consideran datos locales durante su estudio (Becerra, Gutiérrez, 2006).

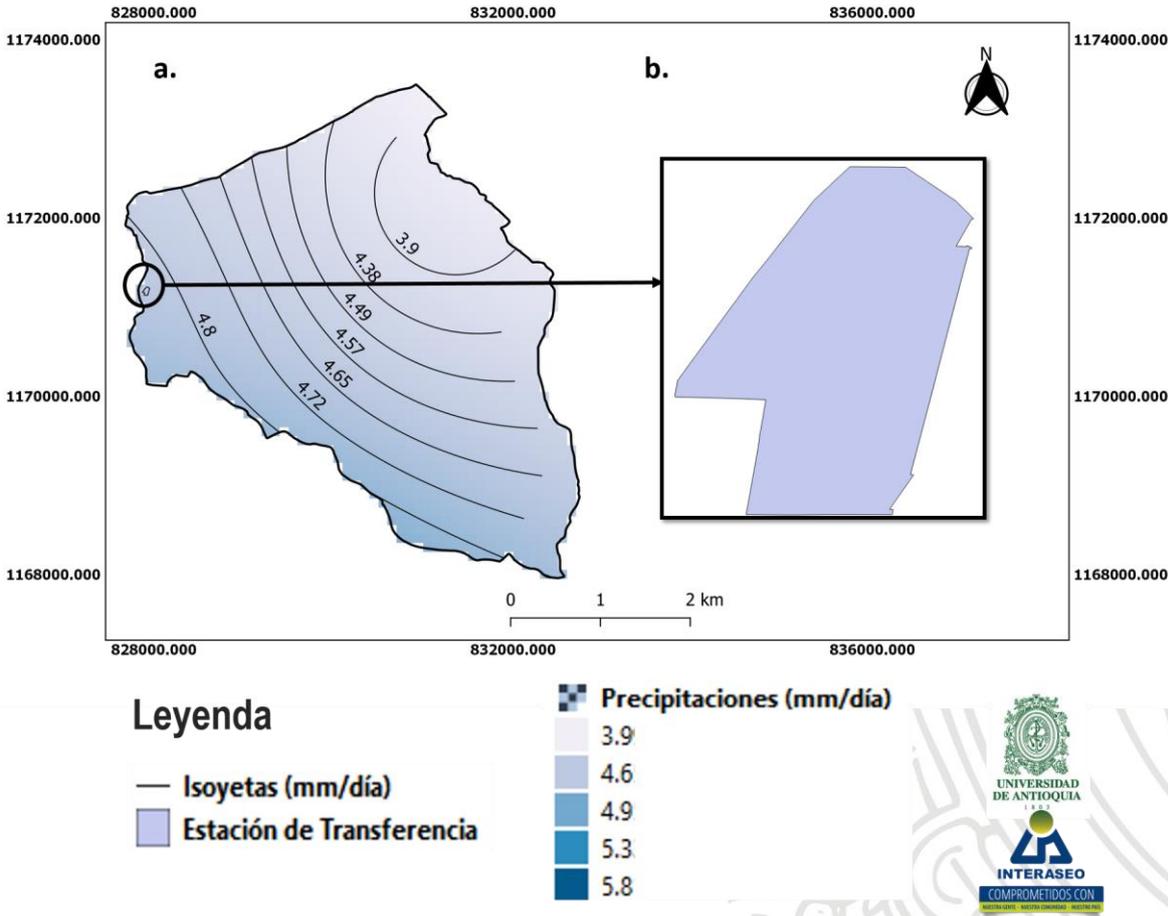


Figura 4. Influencia de la precipitación sobre la zona de estudio. Fuente: propia.

La figura 4 representa el mapa de isoyetas para el municipio de Sabaneta donde se encuentra ubicada la estación de transferencia. Se deduce que la zona de estudio presenta en promedio lluvias diarias de 4.6 mm/día. El anterior valor, es la evidencia de los aumentos en los consumos energéticos, operativos y de reactivos químicos generados cuando ocurre los eventos de lluvia, obligando aumentar las medidas operativas para tratar esta agua una vez mezclada con los lixiviados en el tanque de almacenamiento o tanque manhole. Adicionalmente, la influencia de la precipitación es un factor importante en la zona de estudio, en efecto, la anterior situación es

común que pase durante todos los días operativos de la planta, representando gastos económicos mayores a los que normalmente esta entidad debería tener.

En cuanto a términos legales, según el decreto 3930, se prohíbe el vertimiento de aguas residuales no domésticas o industriales sin tener previamente un tratamiento y a adicional a esto, el agua tratada debe cumplir los valores máximos permisibles dados por la Resolución 631, artículo 14. Por tanto, es clara la obligación que tiene Interaseo, en hacer el tratamiento a esta mezcla de líquidos generada en la estación de transferencia.

Por otro lado, en las figuras 5 y 6, se detallan los volúmenes de agua y costos generados por la ocurrencia de los eventos de precipitación sobre la estación de transferencia.

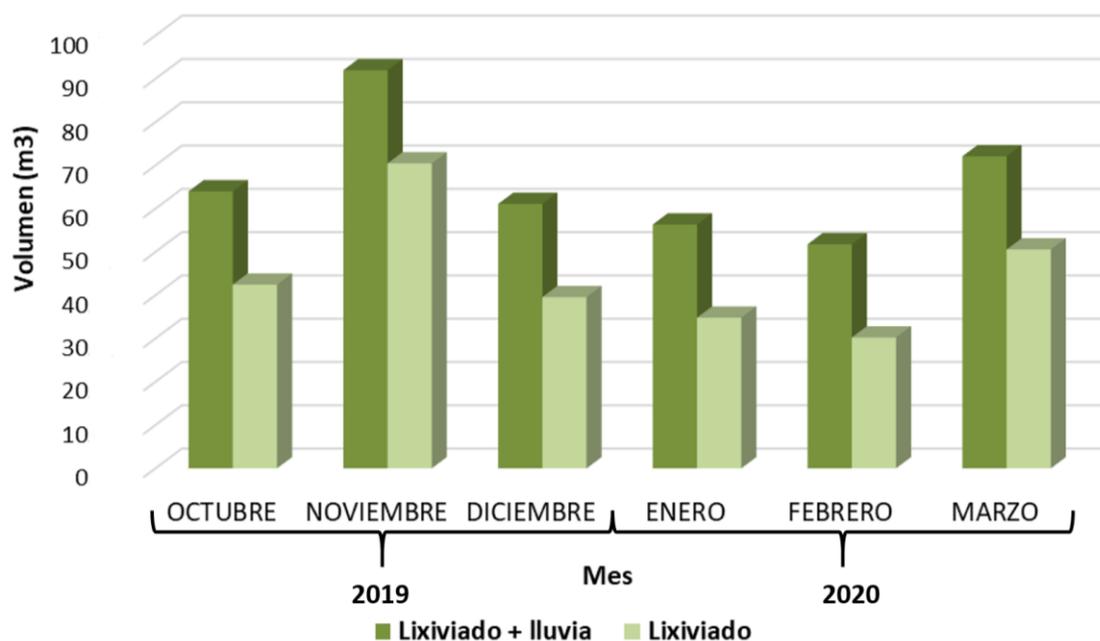


Figura 5. Comparación de los volúmenes tratados de lixiviados y agua lluvia. Nota. Los volúmenes de lixiviados fueron calculados considerando el seguimiento de la bitácora de la PTL, mientras que los volúmenes de agua lluvia fueron calculados según el área de la estación de transferencia y la cantidad de agua diaria precipitada sobre dicha zona. El estudio se hace por el tiempo de duración del proyecto de prácticas (6 meses) Fuente: propia.

En general, los eventos de lluvias exigen mayores volúmenes de agua a tratar, encontrando en promedio, aumentos diarios cercanos a los 21 m³ (figura 5, tabla 3). Por otra parte, la máxima cantidad de lixiviado + lluvia ocurrido durante todo el semestre, fue para el mes de noviembre y esto se debe a la influencia del régimen bimodal de la precipitación del país, ocurriendo al inicio del año entre marzo-abril-mayo y a finales entre septiembre-octubre-noviembre (Guzman, 2014). En efecto, la presencia de dicho régimen, obliga a la empresa a aumentar las medidas de gestión que permitan dar manejo a estos eventos y provisionar a la planta de insumos

requeridos para dar abasto con el tratado de agua lixiviada y evitar verter, especialmente en las dos épocas mencionadas.

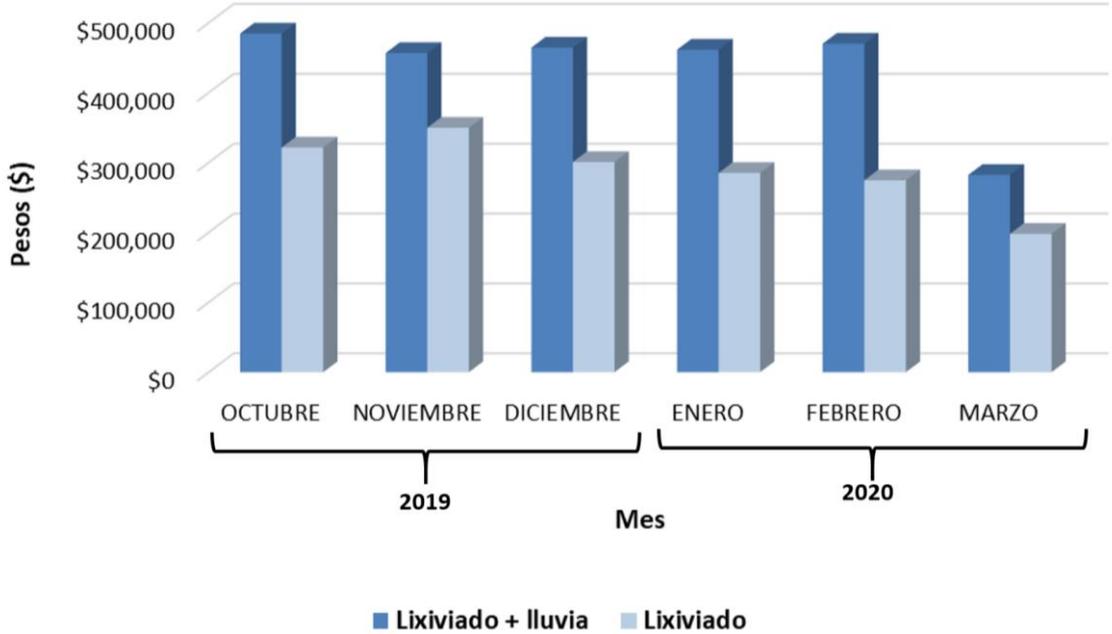


Figura 6. Costos de tratamiento de volúmenes por lixiviados y agua lluvia. Fuente: propia

De la figura 6, se obtiene la relación de costos que son generados durante el tratamiento de lixiviados y aguas lluvias. Para determinar estos valores se tuvieron en cuenta el cobro de servicios públicos, insumos químicos, nómina de trabajadores y elementos de protección personal. De forma aproximada, se encontró que los consumos agregados sólo por el tratamiento de agua lluvia son cerca de \$148.000 por m³ (tabla 3). Ahora, contrastando la figura 5 y 6, se determina la existencia de una correlación directamente proporcional entre costos y volúmenes de agua, teniendo entonces, que aumentos en el volumen de lixiviado, implica un aumento directo de los consumos necesarios para tratar determinada cantidad de la mezcla de líquidos percolados y agua lluvia.

Tabla 3
Cuadro resumen de los costos y volumen de lixiviado tratado diario

Área Estación de Transferencia (m ²)	Precipitación promedio (mm/día)	Volumen de agua x lluvia (m ³ /día)	Costos (m ³ /día)
4627.11	4.65	21.53	\$ 148.302

Nota. Fuente: propia

De la tabla 3, se logra entender de forma más precisa cuál es la influencia de los eventos de lluvia sobre la producción diaria de lixiviado en la planta de tratamiento, teniendo que, en un área de 4631.11 m² (área de la base operativa), llueve en promedio 4.65 mm/día y esto genera en toda la estación 21.53 m³ de agua lluvia, los cuales llegan directamente al tanque manhole para ser tratados junto con los

lixiviados. En consecuencia, el anterior aumento en el volumen a tratar, ocasiona un gasto adicional de \$148.402 por m³ de agua.

Con el análisis anterior, resulta de gran importancia tomar medidas necesarias para corregir las conexiones hidráulicas con las que actualmente la base cuenta, considerando que son eventos que continuamente ocurren y que a su vez exigen una mayor operatividad de todas las unidades de tratamiento que describe a la planta.

Una alternativa para corregir este hecho, es implementar a partir de obras civiles, una separación adecuada de dichas redes, evitando la mezcla de las aguas y reduciendo la tendencia a ocasionar vertimientos. Asimismo, las líneas que conducen las aguas lluvias, podrán acumularse en un recipiente y permitirán ser utilizadas en diferentes actividades de lavado o riego de plantas dentro de la estación.

Fallas operativas de las unidades de tratamiento de la PTL

A pesar que la planta de tratamiento está relativamente nueva, se encontró en los resultados fallas contundentes que, desde un punto de vista operativo y ambiental, deben ser corregidos cuanto antes, garantizando la eficiencia de la misma a largo plazo. Asimismo, la finalidad es no alterar considerablemente los costos operativos de la planta, sino pensar en formas viables desde un punto de vista económico y ambiental, pero que sean aplicables y eficientes para las necesidades que esta requiere. Las fallas y las propuestas de mejora se consideran a continuación:

1. Obstrucción de tuberías y bombas

- **Condición del diagnóstico**

Las bombas y tuberías de la planta de tratamiento presentan constantemente fallas operativas debido a la obstrucción por la presencia de sólidos orgánicos e inorgánicos, los cuales son provenientes de la recolección de los residuos domiciliarios, impidiendo la operación normal de la planta y generando gastos económicos para su reparación.

Análogamente, las redes hidráulicas de las aguas lluvias y de los lixiviados se encuentran interconectadas, por tanto, en eventos de lluvia la escorrentía lava los residuos de menor tamaño que se encuentran en calles y patios de la estación de transferencia, siendo incorporados al tratamiento de lixiviados y convirtiendo la anterior situación en un evento más crítico para la operación, debido a la frecuente colmatación de las membranas que trabajan por filtración.

Por otra parte, una de las medidas de mitigación para la emisión de olores ofensivos, los cuales son producto de la transferencia de residuos y tratado del agua lixiviada, son los muros verdes que rodean por completo a la estación de transferencia. Por la acción del viento, las hojas secas caen al suelo, llegando a las redes hidráulicas y finalmente al tanque manhol, aumentando la materia orgánica y generando un mayor esfuerzo en las primeras unidades de tratamiento para remover este material junto a otros residuos sólidos que llegan a este.

- **Condición de mejora**

Con las condiciones preexistentes, se presenta a continuación las propuestas de mejora debido a la presencia de sólidos de mediano y menor tamaño que impiden la operación normal del tren de tratamiento para lixiviados.

Rejillas: En la planta de tratamiento existen 9 rejillas para la retención de sólidos, sus dimensiones son de 20 cm de ancho por 30 cm de largo y con tamaños de poro de 10 mm. Frecuentemente se encuentran obstruidas por influencia de los constantes sólidos que pasan a través de ella y porque no se les hace una limpieza en los tiempos determinados, teniendo en cuenta el cronograma de orden y aseo determinados por la base operativa.

Por tanto, se propone manejar una lista de chequeo, donde cada operario evidencie sus tareas cumplidas durante su jornada laboral. Para comprobar esto, se deberían registrar fotografías con su respectiva fecha y hora, antes y después de la limpieza. Eso permite ser más rigurosos con la limpieza de las rejillas y ayuda también en la ejecución de orden y aseo de la base operativa en general.



a.



b.

Figura 7. Rejillas del tratamiento preliminar de la PTL. Figura 7a. Rejilla del tratamiento preliminar limpia. Figura 7b. Rejilla acumulada de materia orgánica y otros residuos. Fuente: Propia

Tanque cribado: Las mallas de 1 mm de diámetro que contiene el tanque de cribado se colmatan fácilmente, producto de la carga orgánica e inorgánica que contiene el lixiviado. Lo anterior, obliga al fluido a escapar por agujeros cuya

dimensión es de 5 mm (figura 8), permitiendo el paso de sólidos de un tamaño considerable a la siguiente unidad de tratamiento.

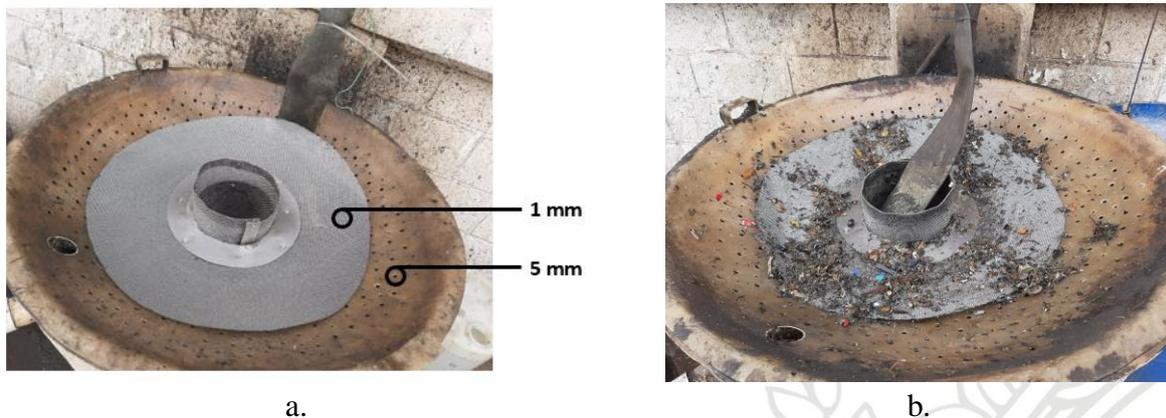


Figura 8. Rejillas del taque cribado. Figura 8a. Rejillas limpias antes del tratamiento. 8b. Rejillas con material sólido orgánico e inorgánico después del paso de lixiviados. Fuente: Propia.

El anterior problema se puede abordar de dos maneras:

1. Implementando un nuevo tanque de mayor capacidad. De esta forma, el agua que llega a esta unidad se distribuye en un área mayor y evita la colmatación de la rejilla de acero o por lo menos no tan rápidamente. Lo anterior, da tiempo de remover los residuos sólidos acumulados de forma manual en las rejillas, evitando el paso de sólidos por los agujeros plásticos de 5 mm y que llegan directo al tanque homogenizador.
2. Cambiar la rejilla de acero de 1 mm por una con las mismas dimensiones y que encierre por completo el tanque cribado, incluyendo los agujeros de 5 mm de diámetro.

Desarenador: A partir de un flujo laminar, el agua pasará por canales hidráulicos que permitirán una reducción en la velocidad y darán paso a la precipitación de arenillas y demás sólidos que por su peso pueden sedimentar. El área de la localización deberá contar con un espacio suficiente para permitir la ejecución e implementación del sistema, garantizando un mantenimiento sencillo, que se encuentre cerca al sitio de captación y que no presente riesgo a inundaciones en las épocas de lluvia (SEMARNAT,2016).

Se recomienda hacer un desarenador rectangular de flujo horizontal (figura 9), preferiblemente de 2 canales que permitan hacer la limpieza de cada uno de estos de tal manera, que no se interrumpa la operación del tratado del agua y permita controlar su velocidad laminar.



Figura 9. Desarenadores de dos canales. Desarenador prototipo para ser implementado en la planta de tratamiento. Fuente: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Pretratamiento y Tratamiento Primario (2016)

Por otra parte, para que el desarenador cumpla su función, se debe evaluar lo siguiente antes de su instalación:

- El área superficial de los canales debe ser suficiente, de tal forma, que permitan a las partículas sólidas, hacer el recorrido de estos canales en tiempos iguales o mayores a los tiempos de velocidad de asentamiento diseñado.
- Por tratarse de una planta de tratamiento con un caudal de diseño pequeño (1 l/s), la velocidad del agua debe ser menor a 0.3 m/s para garantizar un flujo laminar, evitando el arrastre de las partículas sedimentables a la siguiente unidad de tratamiento.
- La frecuencia de purga o limpieza del desarenador debe darse con una frecuencia diaria que evite la acumulación de sólidos.

Finalmente, se muestran los criterios de diseño para desarenadores horizontales considerando el caudal de diseño de la planta de tratamiento

Tabla 4
Características de diseño de un desarenador de flujo horizontal

COMPONENTE	RANGO	OBSERVACIÓN
Dimensiones	-	Tener en cuenta el área a intervenir, nivel freático y riesgo a inundación
Profundidad del agua (m)	0.6 – 1.5	Depende del área del canal
Longitud (m)	3 - 25	En función de la profundidad del canal y de la velocidad de sedimentación de la arena

Velocidad horizontal (m/s)	0.15 – 0.4	Velocidad óptima 0.3 m/s
Tiempo de retención a gasto pico (s)	15-90	En función de la velocidad y la longitud del canal

Nota. Fuente: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Pretratamiento y Tratamiento Primario (2016)

Muros verdes: Entre las especies de árboles que conforman los muros verdes, se destaca la familia de la Leucadena, es un árbol que se caracteriza por tener hojas muy pequeñas, las cuales por la acción mínima del viento caen al suelo. Además, por su pequeño tamaño, fácilmente llegan a las redes hidráulicas. Esta especie se encuentra principalmente en la zona donde está ubicado el tanque manhole, por tanto, caen directamente sobre este o muy cerca al mismo. Para este caso, se propone instalar un anejo mosquetero de calibración fina sobre los canales hidráulicos que impidan el contacto de estas hojas con el agua lixiviada y con el tanque manhole.

2. Trampa grasas

- **Condición de diagnóstico**

No es efectiva la purga de grasas, esto se evidencia porque en las siguientes unidades de tratamiento hay presencia de capas densas en la superficie del agua o hay espumas producto de la emulsión de este contaminante.



a.



b.

Figura 10. Presencia de espumas en tanques de almacenamiento. Figura 10a. Espuma en el tanque de clarificado. Figura 10b. Espuma en el tanque de almacenamiento de agua, previo a la osmosis inversa. Fuente: Propia.

- **Condición de mejora**

Implementar buenas prácticas operativas al momento de hacer la purga de grasas tal como lo recomienda el manual de la planta. Según el manual, esta purga se

realiza hasta los 15 cm por debajo del nivel donde queda acumulado este contaminante, por tanto, el indicador para dejar de hacerla será cuando no salga más agua de la válvula que permite el escape de este contaminante.

Lo anterior, se debe hacer cada vez que el agua pase por esta unidad de tratamiento y dando un tiempo de espera mientras que el agua queda estática y toda la grasa quede acumulada en la parte superior. De esta forma, permite evitar que el lixiviado fluya a la siguiente unidad con residuos de dicho contaminante, de lo contrario, aumentaría la probabilidad de daños en los procesos de limpieza por su viscosidad, obstruyendo productos o impidiendo la correcta aireación en los sistemas.

3. Dosificación de reactivos químicos

• Condición de diagnóstico

El agua proveniente desde tanque floculador al tanque clarificado presenta comúnmente una tonalidad muy oscura, esto se debe a la turbidez propiciada por las partículas en suspensión y disueltas que no alcanzaron a flocularse. Asimismo, contar con una gran cantidad de estas partículas en las siguientes unidades de tratamiento, pueden ocasionar un desgaste significativo por efecto de los constantes mantenimientos que son requeridos en los sistemas de membranas.

A continuación, se evidencian las principales fallas operativas que ocasionan el anterior resultado en el agua:

- No se cuenta con instrumentos que permitan definir la dosificación óptima de los reactivos químicos (PAC y CAL) en los lixiviados. Desde el primer día que entró en operación la PTL, se han implementado las dosificaciones sugeridas por el contratista de la planta, sin considerar la gran variabilidad que pueden presentar estos líquidos percolados en sus concentraciones y parámetros a diario.
- No se respetan los tiempos necesarios para que el coagulante actúe eficientemente sobre las partículas suspendidas y disueltas presentes en los lixiviados. Por tanto, una vez se van generando los flocs y empezando a precipitar, el agua va pasando por reboce al tanque clarificado, impidiendo el proceso de sedimentado. Lo anterior se debe en primer lugar, porque no se conoce el tiempo en el cual el reactivo químico hace efecto sobre el agua y, en segundo lugar, porque en ocasiones es necesario tratar altos volúmenes de agua para evitar vertimientos desde el tanque manhole a las redes hidráulicas que conectan directamente al río Aburrá.
- Al no conocerse la dosificación óptima en el tratado de lixiviados, en ocasiones se aumenta o disminuye las cantidades adicionadas de los reactivos químicos al

agua, esto se hace como medida correctiva cuando se presenta una alta turbiedad en la misma. Sin embargo, este hecho no es efectivo debido a que no hay cambios significativos. Esto se explica al considerar los siguientes dos escenarios: El primero es cuando hay un déficit en la adición de los químicos, implicando que el material coloidal no alcance a reaccionar con el coagulante, debido a su baja concentración. El segundo, ocurre cuando hay un exceso, se forman muchos floc en el agua, predominando aquellos de menor tamaño, los cuales requieren de un mayor tiempo para aglomerarse y poder precipitar.

- **Condición de mejora**

A partir de los procesos de coagulación-floculación-sedimentación y filtración, se permite eliminar el mayor porcentaje de sólidos disueltos y suspendidos contenidos en los lixiviados. El procedimiento anterior es efectivo, cuando se implementan dosificaciones adecuadas de los reactivos químicos (Martínez, 2018). En consecuencia, se propone provisionar con los siguientes equipos a la PTL y garantizar el control del agua que se va a tratar:

- **Teste de jarras:** Esta herramienta permite hacer una simulación a pequeña escala, evaluando de manera fácil y ligera la dosis óptima del coagulante para su aplicación. Es un método el cual se desarrolla a partir de un proceso de mezcla rápida (coagulación), mezcla lenta (floculación) y sedimentación. Adicionalmente, permite comparar el desempeño de coagulantes o la combinación de estos al considerar parámetros como el tiempo de agitación, gradiente de velocidad y cantidad de biosólido generado (Ovalle, Moreno-2014). También se tiene que, debido a la alta variabilidad que presentan las cargas contaminantes en los lixiviados, es necesario conocer las dosis adecuadas cada vez que se haga el tratamiento de estos.

Por otro lado, los datos del test de jarras no solo permitirán determinar las concentraciones adecuadas para los procesos de coagulación, sino también que ayudarán a determinar las cantidades necesarias de soda cáustica a dosificar, con el fin de neutralizar el flujo característicamente ácido y que es pertinente previo al proceso de coagulación.

- **Peachímetro:** Debido a la característica de inestabilidad que presentan los lixiviados, estos requieren ser medidos a partir de parámetros in situ y de forma constante. Además, es un complemento al considerar el test de jarras, logrando determinar cómo es la variación del pH en el agua antes y luego de ser dosificado con el reactivo, teniendo en cuenta que este parámetro es una causa que puede afectar la eficiencia de remoción del coagulante, sino se encuentra dentro del rango adecuado.

De lo anterior, se recomienda contar con un medidor que sea multiparámetro, permitiendo cuantificar mínimamente el pH, conductividad, oxígeno disuelto y temperatura, de esta forma se logra tener un seguimiento controlado de los lixiviados, entiendo las variaciones normales que estos presentan y a partir de esto construir una base de datos que permita identificar de acuerdo a las mediciones que el agua presente, las dosificaciones adecuadas de los coagulantes.

Ahora, respecto a los tipos de reactivos químicos que son implementados en los procesos de coagulación-floculación en la planta de tratamiento, no se pudo llevar a cabo un estudio preciso sobre la eficiencia que tienen estos al remover partículas suspendidas y disueltas en el agua, debido a la ausencia de herramientas para su análisis. Sin embargo, bajo un sustento teórico y estudios previos, se reconocen algunas recomendaciones descritas a continuación que permitan determinar si realmente es conveniente aplicar o no estos reactivos en la clarificación del agua.

- **CAL:** Es aplicada en los procesos físico-químicos para lograr una coagulación química y floculación masiva de sólidos suspendidos. Por lo general, estos sólidos se precipitan sin necesidad de agregar un producto químico, sin embargo, esta precipitación tiene a ser muy lenta, ocasionando limitaciones en la planta de tratamiento. Otro punto a considerar son los coloides, son partículas que normalmente se caracterizan por tener cargas eléctricas negativas, que se repelan entre sí e impide la formación de masas con peso suficiente que pueden precipitar. En consecuencia, la adición de CAL, permite desestabilizar los coloides al neutralizar las cargas negativas y formar flóculos más grandes y pesados (Grupo calidra, 2002).

Al considerar lo anterior, la adición de la CAL resulta ser factible, sin embargo, según el panel de expertos sobre el tema del manejo adecuado de plantas de tratamiento (Interaseo,2020), esta presenta algunas limitaciones, por ejemplo, no solubiliza al 100% en el agua, ocasionando constantemente obstrucciones en los dosificadores e incrustaciones en tuberías. Este reactivo requiere también una constante agitación, de lo contrario, una vez se deja de mezclar, el material diluido en el agua se precipita, en efecto, requiere siempre de un mezclador automático que constantemente este revolviendo la mezcla. Además, este químico es corrosivo y de un pH alto, lo cual puede ocasionar variaciones de este parámetro considerablemente en el efluente final y salir del rango permisible (6-9), según lo define la Resolución 631 del 2015.

- **POLICLORURO DE ALUMINIO (PAC):** En términos operacionales es un compuesto inorgánico favorable para remover materia coloidal y color en los sistemas acuosos, debido a su buena velocidad para la formación de flocs y sedimentación, presentando, además, un bajo costo en el mercado y

concentraciones mínimas de aluminio residual (Ortega, 2016). Aun así, la coagulación resulta efectiva solo cuando el pH es muy alto, reduciendo no solo su eficiencia de remoción cuando no se cumple esta condición, sino también que puede generar cambios en los valores óptimos del pH, según lo exigido en la normatividad vigente. A pesar que el PAC es una buena alternativa implementada en el clarificado del agua, es recomendable considerar a futuro nuevos coagulantes con características orgánicas, con un rango de pH más amplio y cuyo parámetro no se vea afectado por la adición del coagulante.

4. Aprovechamiento de biosólidos

- **Condición de diagnóstico**

Los biosólidos generados en la PTL son de tipo físico-químico y son producto del proceso de coagulación-floculación. En promedio se generan 30 m³/mes de este residuo, no son aprovechados y las cantidades producidas exceden la capacidad del lecho de secado, implicando hacer purgas incompletas del tanque floculador.

Es fundamental hacer purgas adecuadas en las frecuencias estipuladas, de lo contrario, se propicia una acumulación de lodos, los cuales pueden pasar a los tratamientos que funcionan por filtración y afectarían su funcionamiento debido a su rápida colmatación.

Adicionalmente, el lodo es extraído y llevado a los trailers en condiciones muy húmedas, por tanto, pueden ocasionar vertimientos durante el transporte de los residuos sólidos al relleno sanitario, ocasionando infracciones y daños al medio ambiente.

- **Condiciones de mejora**

Los biosólidos producto del tratado de aguas residuales no domésticas, no están reglamentados en Colombia, sin embargo, por sistemas de gestión ambiental las corporaciones ambientales son autónomas de solicitarlo o no la caracterización de este residuo. En efecto, por seguridad y por buenas prácticas ambientales, es recomendable que la empresa realice un monitoreo e identificación de estos residuos para determinar su grado de peligrosidad y saber qué tipo de lodo se está manipulando. A continuación, se sugieren algunos cambios que permiten hacer una mejor maniobra de estos residuos, mitigando su impacto al medio ambiente y mejorando el rendimiento operativo de la PTL.

- Para reducir la cantidad de humedad en los biosólidos se recomienda implementar lámparas halógenas en cada lecho de secado, las cuales, a partir de

la incandescencia, logran remover el agua de una forma más fácil y rápida, junto al proceso de evaporación natural.

- Garantizar una mejor purga en el tanque floculador, implica instalar nuevos lechos de secado, permitiendo que aumente la capacidad de almacenar biosólidos durante su deshidratación. Lo anterior, es una idea factible, teniendo en cuenta que existe un área disponible para instalar dos más de estos lechos, teniendo un total de 4 unidades en servicio para esta actividad.
- Según expertos, considerar un aprovechamiento de los biosólidos producto de lixiviados para el compostaje, no es efectivo si se quiere hacer una incorporación de este residuo al ciclo económico. Lo anterior, se debe a los estándares y selectividad que tienen los clientes a la hora de seleccionar el producto como abono para cultivos y que no afecte su producción. Aun así, se puede aprovechar como abono en las zonas verdes con las que cuenta la empresa. Para conseguir esto, se debe partir inicialmente de un diagnóstico que permita identificar las características de peligrosidad. Es importante considerar que, si los resultados son residuo peligroso, no se le puede hacer un aprovechamiento, pero sí se puede realizar una disposición adecuada del mismo, solicitando a terceros su desactivación y exigiendo el certificado de destrucción.

5. Frecuencias de mantenimiento

• Condición de diagnóstico

Desde la inauguración de la PTL, no se han realizado mantenimientos al tanque homogenizador, de clarificado y floculador. A lo anterior y teniendo en cuenta los sólidos de gran tamaño que escapan del tratamiento preliminar, los lodos concentrados en el fondo y las incrustaciones en las paredes de dichos tanques, ocasionan obstrucciones continuas en las bombas y tuberías durante el tratamiento.

• Condición de mejora

Se recomienda programar mantenimientos mensuales con un contratista especializado en la limpieza de tanques de gran capacidad, que cuenten con certificados en cursos de altura y espacios confinados. Asimismo, que estén provistos con los elementos necesarios de protección personal y confieran los certificados necesarios una vez hecho la actividad.

Como una alternativa para llevar a cabo un control y seguimiento adecuado, no solo del mantenimiento de dichos tanques, sino también de todas las unidades de tratamiento en general, se recomienda realizar un cronograma de actividades donde se plasmen los procedimientos y los tipos de mantenimientos, frecuencias y

evidencias fotográficas que sustenten su ejecución. Esta información será útil, además, en los procedimientos durante auditorías, certificaciones y permisos ambientales que sean necesarios o exigidos a la organización.

6. Cuarto de químicos

• Condición de diagnóstico

Con base a la matriz de compatibilidad y las fichas de seguridad de cada sustancia química, se encontró que el cuarto de químicos no cumple con las condiciones adecuadas de almacenamiento.

El incorrecto almacenamiento de este cuarto puede dar origen a diferentes accidentes que no solo afectan la integridad de una persona, sino también la operación normal de la PTL y al medio ambiente. Asimismo, es indispensable contar con protocolos adecuados para la manipulación de estas sustancias, que eviten un riesgo por su manipulación o cuando se encuentre en contacto con otros productos.

A continuación, se describen los incumplimientos encontrados:

1. El cuarto de químicos cuenta con un área de 4.82 m² y en este se almacena CAL, PAC, peróxido de hidrogeno, carbón activado, ácido cítrico y soda cáustica. En promedio, se tiene que la cantidad mensual de una sustancia química almacenada es de 10.000 kg para un reactivo sólido y 800 L de un reactivo líquido. Considerando lo anterior, la capacidad de almacenamiento es deficiente para el acopio de dichas sustancias, acumulándose unas con otras e impidiendo una separación prudente mientras se usan.
2. La zona de almacenamiento tiene condiciones de ventilación inadecuada, impidiendo el flujo del aire y evitando temperaturas óptimas que ayuden a tener el espacio fresco y ventilado, reduciendo la probabilidad de tener reacciones inducidas por la adición térmica.
3. Agrietamientos en el cuarto de químicos permite el ingreso de humedad durante eventos de lluvia, induciendo la probabilidad de reacciones químicas.
4. Ausencia de señalización que advierta el riesgo de las sustancias contenidas en el espacio almacenado.
5. No hay presencia de ducha, lavajos y extintores cerca al cuarto de químicos para la atención de emergencias.
6. Los pisos no están impermeabilizados en caso de ocurrir un derrame.

7. Falta un sistema de contención de derrame de acuerdo al riesgo y volumen de las sustancias líquidas almacenadas.



a.



b.

Figura 11. Cuarto de almacenamiento de químicos de la PTL. Figura 11a y 11b, representan el inadecuado almacenamiento de las sustancias químicas utilizados en el tratamiento de lixiviados. Fuente: Propia.

- **Condición de mejora**

Según el equipo de Sistemas de Gestión Integral (SGI) de Interaseo, en Colombia no existe una normatividad que defina el área adecuada teniendo en cuenta la cantidad de reactivos químicos a almacenar, sin embargo, a partir de las Normas Técnicas Colombianas (4702,4435,1480 y 1461) y la Ley 55/1993, se permite seguir algunos lineamientos y recomendaciones para implementar adecuadamente el almacenamiento de sustancias químicas. A partir de esta información, se hacen las siguientes recomendaciones:

1. Con la ayuda del área de proyectos, se propone diseñar y ejecutar un nuevo cuarto de químicos que cumpla con las siguientes características:
 - Área adecuada según la cantidad de sustancias químicas a almacenar.
 - La localización del cuarto debe estar lejos del área de trabajo y fuentes de riesgo, de fácil acceso y sobre un terreno firme.
 - Material de construcción no inflamable (concreto, ladrillo).
 - Paredes internas cortafuego con saliente en el techo y espesor adecuado (15 cm de concreto reforzado, 23 cm ladrillo y 30 cm concreto no reforzado).
 - Puerta de fácil acceso y segura para el ingreso solo del personal autorizado.
 - Salidas de emergencia en direcciones opuestas.
 - Impermeabilización del suelo para evitar filtración de sustancias químicas por derrame. Asimismo, que sea liso, antideslizante y de fácil limpieza.

- Diques de contención para derrames y aguas contra incendio (los drenajes deben conducir a un depósito que esté separado del sistema de alcantarillado y protegido contra aguas lluvias).
 - Todo el sistema eléctrico a prueba de explosión.
 - Ventilación adecuada (la ventilación en el techo y paredes proporciona un buen intercambio de aire).
 - Pasillos que permitan una fácil transitividad y manipulación de sustancias.
 - Estanterías metálicas para el almacenamiento de químicos. Estas deben estar llenas de tal manera que los recipientes que contienen líquidos y son de mayor capacidad se ubiquen en los entrepaños inferiores, los productos más peligrosos abajo y los más inofensivos arriba. Adicional, deben contar con anclaje al piso, y en caso de ser metálicas deberán contar con sistema de polo a tierra para evitar descargas electroestáticas.
 - Estibas plásticas que eviten el contacto del químico directo con el suelo, de forma tal que se eviten reacciones químicas relacionadas con el sistema de almacenamiento.
 - Pintura epóxica que permita el lavado de paredes y suelo en caso de que ocurra un vertimiento
 - Kit para el control de derrames, elementos de protección personal y herramientas para controlar incidentes como extintores.
2. Garantizar la vigencia de fichas de seguridad de las sustancias químicas almacenadas. La empresa tiene la responsabilidad de exigir al proveedor esta ficha, la cual no debe tener más de 4 años de ser expedida y debe contar con los 16 ítems que la describen según lo menciona la NTC 4435. Asimismo, las fichas de seguridad deberán mantener actualizada la información pertinente sobre el manejo de cada sustancia y de esta forma acudir a ellas en caso de una emergencia.
 3. Se recomienda señalar los espacios donde están ubicadas las sustancias químicas, teniendo en cuenta la información de los riesgos, pictograma según el Sistema Globalmente Armonizado (SGA) y las recomendaciones en caso de tener un contacto directo con esta. Adicional a esto, se propone señalar con avisos que indiquen la prohibición de personal no autorizado, trabajos en caliente, fumar y demás señalética oportuna para evitar ocasionar riesgos adicionales.
 4. Se propone una tarjeta de etiquetado con la información más relevante de la ficha de seguridad de cada sustancia química de la planta. Lo ideal, es implementar esta medida de etiquetado en los recipientes que la hayan perdido, no sea visible o en caso de un reenvase. Su propósito, es tener una manipulación acertada de los insumos químicos durante sus vidas útil en la planta de tratamiento de lixiviados.

La figura 12, es una propuesta para el etiquetado adecuado de los recipientes.

PALABRA DE ADVERTENCIA		PELIGRO	
		Indicaciones de peligro H271 - Puede provocar un incendio o una explosión; muy comburente H290 - Corrosivo para los metales H302 - Nocivo en caso de ingestión H332 - Nocivo en caso de inhalación H314 + H318 - Provoca quemaduras graves en la piel y lesiones oculares graves	
		Indicaciones de prodeencia P210 - Mantener alejado de fuentes de calor/chispas/llama /superficies calientes. No fumar. P280 - Llevar guantes/prendas/gafas de protección/mascara de protección. P301+P330+P331 - EN CASO DE INGESTIÓN: Enjuagarse la boca. NO provocar el vómito P313- Consultar a un médico P304+P340- EN CASO DE INHALACIÓN: Transportar a la víctima al exterior y mantenerla en reposo en una posición confortable para respirar. P305 + P351 + P338 - En caso de contacto con los ojos: aclarar cuidadosamente con agua durante varios minutos, quitar los lentes de contacto si se llevan y resulta fácil quitarlos, seguir aclarando.	
EEP A USAR 		Información del proveedor PROTOKIMICA S.A.S Carrera 52 # 6 Sur – 35 Medellín, (Antioquia) Colombia Para emergencias (+57) 4-4448787	

Nombre de la sustancia química presentado por la Ficha de Datos de Seguridad (FDS)

Números CAS representan los componentes de fabricación

UN 2014 CAS 7722-84-1

Código de transporte de mercancías peligrosas (ítem 14 de FDS)

Pictogramas del Sistema Globalmente Armonizado (SGA)

Frases H: Representan los riesgos de peligro al manipular la sustancia química

Frases P: Representan la prevención que se debe de tener en la manipulación de la sustancia química

Explicación de los elementos de protección que se deben usar para manipular la sustancia química

Información del proveedor establecida en el ítem 2 de la FDS

Figura 12. Etiquetado para las sustancias químicas de la planta. Ejemplo de ficha para la etiqueta de recipientes que requieran rotulación o son de trasvase. Fuente: Ficha de seguridad del peróxido de hidrogeno Protokimica (2017)

7. Medidas de contingencia

• Condiciones de diagnóstico

Pensar en medidas de contingencia relacionados con la operación de la PTL, se convierte en un tema esencial para llevar a cabo un cumplimiento de procedimientos, acciones y normas básicas, en respuesta oportuna y efectiva a los incidentes o accidentes que pueden ocurrir de forma inesperada en las instalaciones de la planta. Para dar cumplimiento a estas medidas, es necesario hacer un análisis de riesgo, que, anclado a un recurso físico y humano, permite el control y manejo a los sucesos repentinos (EPM, 2008).

El alcance de este trabajo se concentra en las medidas de contingencia producto de los riesgos operacionales y naturales, los cuales están relacionados con las actividades que directa o indirectamente tiene la operación de la planta. A continuación, se evidencian los riesgos específicos identificados:

Tabla 6
Riesgos asociados a la operación de la PTL

Tipo de riesgo	Riesgo específico	Escenarios de riesgo
Riesgo ambiental	Contaminación física, química y biológica de cuerpos agua superficiales y subsuperficiales, fauna, flora y suelo	- Se presentan constantemente fugas de lixiviados, cuando ocurren eventos de lluvia. Esto es debido a los canales hidráulicos que están interconectados para la recepción de lixiviados producto de la descarga de los tanques en los carros compactadores y a las aguas lluvias, almacenándose en el tanque manhole. Esto puede afectar cualquier ecosistema, cuerpo de agua, fauna y flora que sean aledaños al vertimiento, a las comunidades por sus olores y, además, genera multas por parte de la autoridad ambiental competente.
Riesgo natural	Riesgo eléctrico	- Al tratarse de un lugar donde se transfieren residuos sólidos domiciliarios, la presencia de gallinazos y otras aves carroñeras son común en la estación de transferencia. El olor y la oferta alimenticia son atraídas, sobrevolando en manadas y buscando oportunidad para atrapar residuos orgánicos sobre los patios y trailers. Además, las redes eléctricas de la base operativa y postes son el descanso de estos animales. Esto último, ocasiona un riesgo eléctrico, debido a la alta tensión y voltaje en los cajas, cables y transformadores, ocasionando constantemente descargas eléctricas cuando los gallinazos se sobreponen en estos. En efecto, la electricidad se ausenta por horas e incluso días, dependiendo de su magnitud, afectando no solo la operatividad normal de la planta, sino también la estación de transferencia en

general.

Riesgo operativo	Riesgo a vertimientos y pérdidas económicas	- Las bombas y unidades de tratamiento que funcionan a base de energía eléctrica, en ocasiones presentan fallas ya sea por obstrucción, conexiones intermitentes o daño completo de las mismas. Al tratarse de un tren de tratamiento, implica que, si solo uno de sus sistemas falla, la planta no puede operar secuencialmente, por tanto, hay un incrementando del riesgo a verter una vez se exceda la capacidad máxima del manhole.
Riesgo operacional	Incendios explosiones	y - Pueden ocurrir por reacciones químicas teniendo en cuenta las sustancias que son almacenadas en el cuarto de químicos o inducidas por un factor antrópico, aumentando su impacto por la composición de los reactivos que son manipulados.

Fuente: Propia

- **Condiciones de mejora**

Las medidas de contingencia que son propuestas, están orientadas a la ejecución de diferentes actividades preventivas y de control y con base a los riesgos asociados por la operación de la PTL (tabla 6). Asimismo, se recalca lo importante de contar con el recurso humano y material, los cuales contribuyen a prevenir, planificar, corregir y/o mitigar una contingencia en el área de trabajo. A continuación, se listan las propuestas de mejora.

1. Procedimiento en caso de una contingencia por riesgo operativo

En caso de presentarse una emergencia, las formas de actuar y de responder ante determinado acto son diferente en cada individuo. No reaccionar de forma adecuada y oportuna, puede generar la erradicación total del acontecimiento o en su defecto, la propagación y gravedad del mismo (Hidrosuelos, 2015). De lo anterior, se ve la necesidad de implementar un diagrama que indique el paso a paso adecuado a seguir.

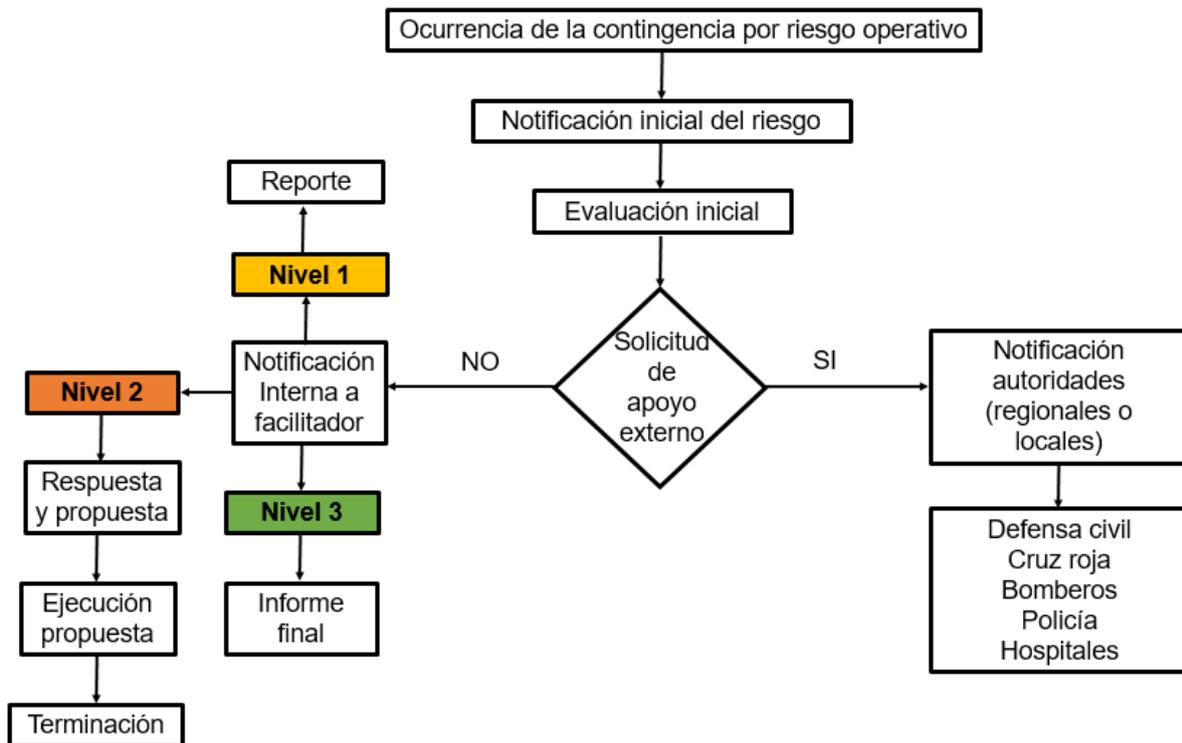


Figura 13. Diagrama de medidas a implementar durante una contingencia debido a los riesgos asociados por la operación de la PTL. Fuente: Planta de Tratamiento de Aguas Residual Bello (EPM, 2008).

El anterior gráfico se convierte en una guía oportuna para afrontar estos eventos, el cual, a partir de capacitaciones y simulacros previos con el personal de la planta, se espera que los resultados ante situaciones críticas, sean atendidos de la manera más efectiva, considerando también las medidas correctivas necesarias de infraestructura y equipos, para dar una mayor cobertura e intervención durante las posibles contingencias ocasionadas.

2. Vertimientos de lixiviados

A partir de obras civiles, se propone acondicionar la planta con un nuevo tanque manhole en forma de pozo, pasando de una capacidad máxima de almacenamiento de 1.65 m³ a una de 5 m³, reduciendo así la probabilidad de verter lixiviados, ya sea en caso de lluvias, por la descarga del líquido percolado de los vehículos recolectores o por ambas razones. Adicionalmente, se tiene que, provisionar de un nuevo tanque que se encuentre bajo tierra, permitirá que el área ocupada por el mismo, pueda ser aprovechada para la operación y actividades habituales que la base operativa requiera.

Si bien, la implementación de este proyecto necesita tiempo para llevar a cabo el estudio de factibilidad, planos y cotizaciones, se considera una medida alternativa mientras se ejecuta esta mejora, para ello, es necesario contar con recipientes plásticos con capacidad mínima de 5 m³ y que a su vez cumplan con la misma

función del tanque manhole. Cabe anotar, que no se considera este recipiente como primer plan para eventos de contingencia por vertimientos, debido a la ocupación de espacio que interrumpe el parqueo y movilidad de tráiler y vehículos compactadores en la zona de patios.

Por otro lado, la planta es operada 10 horas diurnas de lunes a sábado, en consecuencia, es fundamental que esta propuesta sea implementada, debido a la alta probabilidad de lluvia que presenta la zona de estudio, de lo contrario, cuando ocurra este evento natural en el horario nocturno, se pueden generar vertimientos no controlados por la mezcla de agua lluvia y lixiviado. Adicionalmente, contar con horarios de 24 horas en los 7 días a la semana, permitirá un mayor control de estos eventos.

3. Fallas eléctricas en la planta de tratamiento

Para evitar frenar la operación de la PTL cuando ocurran descargas eléctricas, fallas en las unidades de tratamiento y transformadores, se propone contar con personal capacitado en la manipulación de estos sistemas, asistiendo de forma rápida y efectiva para su reparación. Asimismo, provisionar a la PTL de una planta eléctrica, que sirva como fuente de energía cuando esta sea ausente por factores externos y/o internos de la estación.

4. Control de gallinazos

En el mercado, existen diferentes propuestas que pueden contrarrestar la presencia de estas aves sobre la estación de transferencia, desde un punto de vista viable y económico, la opción más recomendada es implementar detonadores. Además, porque se cuenta con la experiencia en rellenos sanitarios, encontrando en esta alternativa buenos resultados (Interaseo, 2020). Su funcionamiento es fácil y parte de una programación en intervalos de tiempos definidos, los cuales por inducción de gas natural y la presión del mismo, permite que ocurra una detonación en seco, ocasionando un ruido intenso que propicia la huida de estos animales.

5. Incendios y explosivos

Inicialmente se propone como medida de control, concientizar y educar a los trabajadores que van a participar en la operación de la planta, con la finalidad de informarlos sobre los posibles riesgos que se pueden generar y de ofrecerles algunas medidas preventivas que se pueden poner en práctica en caso de incendios o explosiones.

Seguidamente, es necesario contar con personal de salud y seguridad en el trabajo que permita estudiar e instaurar un plan de emergencia frente a un conato de

incendio, los cuales pueden ser producidos por reacciones químicas esporádicas o inducidas en el cuarto de almacenamiento. Además, se debe realizar un estudio sobre las herramientas para controlar estos eventos, detallando que sean compatibles de acuerdo a la composición de los reactivos y eficientes para controlarlos. Con lo anterior, se busca que el personal adecuado y con base a los mecanismos para realizar las labores de diseño, aseguren al máximo la reducción de amenazas presentes en la planta por eventos del riesgo objeto.

Finalmente, es pertinente divulgar la información obtenida a partir de capacitaciones, talleres, entrenamientos y conferencias que tengan un impacto informativo, aplicativo y de resultado-logro en relación a este tema. Adicional, se recalca la importancia de tener conexiones con entidades locales y regionales, que atiendan este tipo de eventos cuando no se pueda controlar internamente por la empresa.

Conclusiones

Desde un punto de vista técnico y operativo, el tratamiento preliminar de la PTL no es efectivo a la hora de remover sólidos de gran tamaño, siendo esto la causa principal de las continuas obstrucciones que presentan las bombas sumergibles, tuberías de la planta y membranas en el sistema terciario. En efecto, contar con nuevas unidades de tratamiento, mejorar los sistemas ya instalados y reforzar las frecuencias de limpieza y mantenimiento, lograrían reducir gastos económicos destinados a reparaciones por obstrucción, permitiendo además aumentar el buen desempeño del tren de tratamiento en general.

La estación de transferencia requiere implementar obras civiles para dar lugar a la separación adecuada de las redes hidráulicas, las cuales mezclan las aguas lluvias y lixiviados. Esto es fundamental, al tener en cuenta la poca capacidad que tiene el tanque manhole para almacenar estos líquidos y al alto impacto que ocasiona al medio ambiente si se genera un vertimiento. Análogamente, se deben implementar medidas de contingencia para la respuesta oportuna y efectiva cuando ocurra este incidente, aumentando los almacenamientos, y disminuyendo así, la propagación y gravedad del mismo. Además, se propone aumentar los turnos operativos, pasando de 10 a 24 horas día, para dar una mayor cobertura durante el funcionamiento de la planta y reducir la probabilidad de tener infracciones ambientales por verter lixiviados al Río Aburrá.

Por otro lado, la provisión de asistencia técnica para el manejo de los lixiviados es esencial, sobretodo, al considerar la variabilidad que presentan a diario estos líquidos en su composición, por tanto, es necesario un seguimiento rutinario, el cual permita hacer control y registros sistemáticos de información esencial para medir el desempeño y establecer variables operativas durante la manipulación de los mismos. Con herramientas básicas de test de jarras y peachímetro, se obtendría

información consolidada sobre la dosis óptima de químicos, caudales y producción de biosólidos durante el tratamiento del agua.

Todo lo anterior sustenta la iniciativa de implementar medidas de optimización y modificaciones a lo largo del tren de tratamiento, el cual independientemente del grado de complejidad que éste presente, es necesario contar con asistencia técnica y periódica, apoyada en la capacitación de operarios, protocolos y buenas prácticas operacionales que conduzcan a minimizar los índices de contaminación ambiental, la carga contaminante de los lixiviados y en efecto, mejorando los recursos hídricos del de la región.

En cuanto a los limitantes durante el estudio de este trabajo, se considera la falta de equipos y herramientas que permitieran medir parámetros in situ, monitoreos y caracterizaciones para control del agua. Además, la falta de legislación sobre el tratamiento de los lixiviados, no permitió hacer una matriz legal y listas de chequeo que dieran lugar a un cumplimiento efectivo de las obras y actividades en relación con la planta. En consecuencia, se limita el alcance del proyecto solo a un planteamiento de buena práctica operacional, pues se desconoce el efecto real de las propuestas planteadas sobre el tratamiento de los lixiviados.

A modo de recomendación, se propone hacer nuevamente el cálculo del mapa de isoyetas, pero esta vez, implementando puntos de monitoreo que midan la precipitación dentro de la base operativa, logrando reconocer datos más claros y precisos de la lluvia sobre el área de influencia, permitiendo una mayor veracidad en los resultados y que sirva como ejemplo para otros casos de estudios relacionados con el presente tema. Por otro lado, una etapa obligatoria y posterior al presente trabajo está asociada con el área de proyectos, que permita su financiación y logre dar cumplimiento al diseño y construcción de las mejoras propuestas a la planta de tratamiento.

Referencias Bibliográficas

Avellana, L. (2016). Diseño, propuesta e implementación de un filtro para tratamiento de aguas de uso doméstico e n tanques de reserva en la población del casco urbano de la inspección de San Antonio de Anapoima. Universidad Libre. Recuperado de <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/10401/ANTEPROYECTO%20SEMINARIO%20FILTRO%20ARENA%20ULTIMA%20%20ENTREGA%20JUNIO%202011.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Becerra. R, Gutiérrez. A. Modelación hidrológica empleando isoyetas de relieve, una aproximación geoestadística. Variabilidad y cambio climático: impactos hidrológicos. Cuba, November 2006). Recuperado de <https://iahs.info/uploads/dms/13637.15-62-67-35-308-BECERRA-GUTIERREZ.pdf>

Capacitación en el manejo de plantas de tratamiento de lixiviados. 2020, Sabaneta. Estación de Transferencia Interaseo S.A.S E.S.P

Colmenares, W y Santos K. (2007). Generación y manejo de gases en sitios de disposición final. Recuperado de <http://www.ingenieriaquimica.org/system/files/rellenosanitario.pdf>

Congreso De La República de Colombia. Ley 55 de 1993. Por Medio de la cual se aprueba el “Convenio Número 170 y la Recomendación Número 177 sobre la seguridad en la utilización de los productos químicos en el trabajo”, adoptados por la 77ª Reunión de la Conferencia General de la OIT, Ginebra,1990. Bogotá 1993

Consejo Colombiano de Seguridad (CCS). Almacenamiento de Sustancias Peligrosas. Código CI No.20

Decreto 0922. MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO. Bogotá D.C, Colombia. 8 de mayo de 2013. Recuperado de <http://www.minvivienda.gov.co/DecretosAgua/0920%20-%202013.pdf>

Ehrig, H. (1992). Cantidad y contenidos de lixiviados de rellenos de desechos domésticos. Recuperado de <http://www.bvsde.paho.org/bvsars/fulltext/cantidad.pdf>

García, P. (2018).

Estrategia Nacional para la implementación del Sistema globalmente armonizado de clasificación y etiquetado de productos químicos – SGA - en Colombia (2016-2020). Ministerio de Medio Ambiente. Recuperado de https://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/sustancias_qu%C3%ADmicas_y_residuos_peligrosos/A4__Estrategia_nacional_SGA_2017_ultima_vs.pdf

Evaluación entre el coagulante sulfato de aluminio y policloruro de aluminio. Ortega, Nelson. (2016). Recuperado de https://www.academia.edu/27166377/EVALUACION_ENTRE_EL_COAGULANTE_SULFATO_DE_ALUMINIO_Y_POLICLORURO_DE_ALUMINIO

Fernandez, A. Garcia, P. García, R. et al. Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales. Madrid:CEIM, 2010. pp 1-7. Recuperado de https://www.madrimasd.org/uploads/informacionidi/biblioteca/publicacion/doc/VT/VT2__Tratamientos_avanzados_de_aguas_residuales_industriales.pdf

Giraldo. E. (2014). Tratamiento De Lixiviados De Rellenos Sanitarios: Avances Recientes. Universidad de los Andes. Recuperado de:

https://www.researchgate.net/publication/291213041_Tratamiento_De_Lixiviados_De_Rellenos_Sanitarios_Avances_Recientes

Grupo Calidra Química Natural. Manual de usos ecológicos de la Cal. Grupo Calidra Química natural, 2002. pp 1-99. Recuperado de <http://www.foccal.org/descargas/Tratamiento-AGUAS-CAL.pdf>

Guzman. D et al. Regionalización de Colombia según la estacionalidad de la precipitación media mensual, a través Análisis de Componentes Principales (ACP). Subdirección de Meteorología – IDEAM (2014). Recuperado de: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21789/Regionalizaci%25C3%25B3n%2Bde%2Bla%2Blluvia%2Ben%2BColombia.pdf/92287f96-840f-4408-8e76-98b668b83664>

Hoja de seguridad Peróxido de Hidrógeno. Protokimica. (2017). Versión 04.

IDEAM. (2011). Promedios Precipitación y Temperatura media. Promedio de los años 1981 2010. Recuperado de <https://www.datos.gov.co/Ambiente-y-Desarrollo-Sostenible/Promedios-Precipitaci-n-y-Temperatura-media-Promed/nsxu-h2dh/data>

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (Icontec). Embalajes y Envases para Transporte de Mercancías Peligrosas. Bogotá: Icontec, 1999, II. NTC 4702 (1-9).

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (Icontec) Transporte de Mercancías Peligrosas: Hojas de Seguridad para Materiales. Preparación. Bogotá: Icontec, 1998, 139 p.: II. (Ntc 4435).

Instituto Colombiano de Normas Técnicas Y Certificación. Elementos de Construcción. Ensayo de Resistencia al Fuego. Bogotá: Icontec, 1998, 17 P.: II. (Ntc 1480).

Instituto Colombiano de Normas Técnicas Y Certificación. Higiene y Seguridad. Colores y Señales de Seguridad (Primera Actualización). Bogotá. Icontec: II (N Tc 1461).

Introducción al tratamiento de aguas residuales. (Argentina). <http://www.ingenieriaquimica.org/>. Néstor Rojas (abril 6/2012).

Lidia Vargas. Tratamiento de agua para consumo humano Plantas de filtración rápida. Edición 1. Lima, Perú. 2014. pp 265-303. Recuperado de <http://www.ingenieroambiental.com/4014/seis.pdf>

Manejo y Tratamiento de lixiviados en rellenos sanitarios: Revisión bibliográfica y experiencia en planta de tratamiento de lixiviados de Navarro. Recuperado de

<https://repository.usc.edu.co/bitstream/20.500.12421/677/1/MANEJO%20Y%20TRATAMIENTO.pdf>

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Pretratamiento y Tratamiento Primario. Primera edición. Mexico, 2016. Paginación 24-82. Recuperado de <http://aneas.com.mx/wp-content/uploads/2016/04/SGAPDS-1-15-Libro26.pdf>

Martinez. A. (2018). Análisis y comparación del manejo ambiental de lixiviados como propuesta para el mejoramiento de sus procesos. caso de estudio relleno sanitario Doña Juana (RSDJ) de la ciudad de Bogotá y el relleno sanitario la miel de la ciudad de Ibagué. Universidad Militar Nueva Granada. Recuperado de <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/21135/MartinezNovasAlixonYeraldin2018.pdf?sequence=1>

Méndez et al. Determinación de la dosis óptima de reactivo fenton en un tratamiento de lixiviados por fenton-adsorción. Rev. Int. Contaminación. Ambiental. 26 (3) 211-220, 2010. Recuperado de: <http://www.scielo.org.mx/pdf/rica/v26n3/v26n3a4.pdf>

Mendoza. A (2009). Planta de tratamiento de lixiviados – Parque Ambiental los Pocitos. Universidad del Norte. Recuperado de http://www.redisa.net/doc/artSim2009/TratamientoYValorizacion/Planta%20de%20tratamiento%20de%20lixiviados_parque%20ambiental%20los%20Pocitos.pdf

Méndez et al. Tratamiento fisicoquímico de los lixiviados de un relleno sanitario Ingeniería, vol. 8, núm. 2, mayo-agosto, 2004, pp. 155-163 Universidad Autónoma de Yucatán Mérida, México. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/467/46780213.pdf>

Ovando. R, Moreno. C. (2014). Cartilla guía para la ejecución de prácticas de laboratorio en saneamiento de agua potable. Universidad Católica de Colombia. Recuperado de <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/1797/1/Proyecto.pdf>

Pablos, M et al. (2011). Correlation between physicochemical and ecotoxicological approaches to estimate landfill leachates toxicity. Waste Manag. p.1841-1847.

Patiño, A. (2007). Gestión ambiental y tratamiento de residuos urbanos: propuesta para la zona metropolitana de Guadalajara a partir de las experiencias de la Unión Europea. Universidad de Complutense Madrid. Recuperado de <https://eprints.ucm.es/6492/>.

Perez, A. (2019). Manual de operaciones de la planta de tratamiento de aguas residuales para aguas residuales no domesticas en la estación de transferencia. p. 1-74.

Plan de contingencia para el sitio de disposición final “marmolejo” de la ciudad de Quibdó. Consorcio Soluciones Hidrosuelos. Septiembre de 2015. CÓDIGO: CSH-I-03-PDC VERSIÓN: 0.

Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Bello. Empresas Públicas de Medellín E.S.P. (16/04/2008). Recuperado de https://www.grupo-epm.com/site/Portals/22/Docs/documentos_de_interes/ptar_bello/hta-a-rp-01-10-c09-r2.pdf?ver=2015-06-16-124546-023

Puerta, S. Los residuos sólidos municipales como acondicionadores de suelos. Revista Lasallista de Investigación, vol. 1, núm. 1, junio, 2004, pp. 56-65 Corporación Universitaria Lasallista Antioquia, Colombia

Raco, B et al. (2013). A Quick and Reliable Method to Detect and Quantify Contamination from MSW Landfills: A Case Study. Water Air: Springer Link Soil Poll. p.1-18. Recuperado de <https://link.springer.com/article/10.1007/s11270-012-1380-5>

Ramírez, D et al. (2013). Determination of organic compounds in landfill leachates treated by Fenton–Adsorption. Waste Manag. Vol. 33. p 390-395. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X12003194>

Resolución Metropolitana Radicado 00-003457. Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA). Medellín, Colombia. 13 de diciembre del 2018. Recuperado de <https://www.metropol.gov.co/GacetaVirtual/2018/Diciembre%202018/Resoluciones/Resoluci%C3%B3n%202018%20003457.pdf>

Resolución 0631. MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Bogotá D.C, Colombia. 17 de marzo de 2015. Recuperado de https://docs.supersalud.gov.co/PortalWeb/Juridica/OtraNormativa/R_MADS_0631_2015.pdf

Romero, D. (2017). Gestión ambiental del sistema de tratamiento de lixiviados producto de la biodegradación de residuos sólidos urbanos en un relleno sanitario Colombiano. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Recuperado de <http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/13933/13/RomeroTorresDiegoCamilo2018.pdf>

Santiago, J. F. (2002). Estrategias de tratamiento de residuales y reúso de aguas tratadas como alternativa de solución ante los eventos de sequía II Seminario

Internacional del Uso Integral del Agua, Centro de Hidrología y Calidad de las Aguas, La Habana, Cuba.

SOCYA. (2018). Estación de transferencia. Recuperado de <https://socya.org.co/estacionde-transferencia-de-residuos-solidos/>

Solano. G. (2014). Propuesta de adecuación del sistema de tratamiento de lixiviados del Relleno Sanitario Río Azul para el cumplimiento de parámetros de reuso del efluente. Universidad de costa rica. Recuperado de <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/bitstream/123456789/3408/1/34567.pdf>

Sunsa. (2017). Tratamiento ecológico de aguas residuales a base de Peróxido de Hidrógeno. Recuperado de <https://sunsa.cl/tratamiento-ecologico-de-aguas-residuales-a-base-de-peroxido-de-hidrogeno/>

Torres, I. (2016). Propuesta de mejoramiento de las operaciones en la planta de tratamiento de agua residual en el municipio de La Calera (Cundinamarca). Universidad Católica de Colombia. Recuperado de [https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/13947/4/PROPUESTA%20DE%20MEJORAMIENTO%20DE%20LAS%20OPERACIONES%20EN%20LA%20PLANTA%20DE%20TRATAMIENTO%20DE%20AGUA%20RESIDUAL%20EN%20EL%20MUNICIPIO%20DE%20LA%20CALERA%20\(CUNDINAMARCA\).pdf](https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/13947/4/PROPUESTA%20DE%20MEJORAMIENTO%20DE%20LAS%20OPERACIONES%20EN%20LA%20PLANTA%20DE%20TRATAMIENTO%20DE%20AGUA%20RESIDUAL%20EN%20EL%20MUNICIPIO%20DE%20LA%20CALERA%20(CUNDINAMARCA).pdf)

Torres, P et al. (2014). Influencia de la edad de lixiviados sobre su composición físicoquímica y su potencial de toxicidad. U.D.C.A Act. & Div. Cient. Vol. 15. p. 245-255. Recuperado de <http://www.scielo.org.co/pdf/rudca/v17n1/v17n1a27.pdf>

Tratamiento de agua y aguas residuales. (Perú). Recuperado de <https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:mjDxP7d5EVcJ:https://www.aguasistec.com/planta-de-tratamiento-de-agua.php+&cd=8&hl=es&ct=clnk&gl=co.>
José Jiménez Borja. (2014)

Zapata A y Sánchez Carmen. (2013) Un método de gestión ambiental para evaluar rellenos sanitarios Gestión y Ambiente, vol. 16. pp. 105-120 Universidad Nacional de Colombia Medellín, Colombia. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/1694/169428420009.pdf>