

**CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE LOS LODOS PRESENTES EN LA
PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE DEL MUNICIPIO DE SANTA
ROSA DEL SUR - BOLÍVAR**

SANDRA MARCELA CALDERON GAONA

**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS
PROGRAMA DE QUÍMICA
PAMPLONA
2016**

**CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE LOS LODOS PRESENTES EN LA
PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE DEL MUNICIPIO DE SANTA
ROSA DEL SUR- BOLÍVAR**

Proyecto de grado presentado para optar el título de Química

ESTUDIANTE:

SANDRA MARCELA CALDERON GAONA

Director

Eliseo Amado González

**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS
PROGRAMA DE QUÍMICA
PAMPLONA**

2016

DEDICATORIA

A dios

Por el don de la perseverancia para alcanzar esta meta

A mi madre María Irene.

Por su apoyo moral y económico en todo momento, por sus consejos, su amor, por la motivación constante que me ha permitido alcanzar mi formación profesional. La cual constituye la herencia más valiosa que pudiera recibir.

A mi padre Fabio.

Por brindarme su apoyo y sus consejos en la adversidad, cuando necesité fuerzas y ánimo para poder afrontar el presente y continuar mis estudios.

A mis hermanos

Por su gran ejemplo a seguir, por estar conmigo y apoyarme siempre.

A mis sobrinos Lina, Esteban y Valery

Por llenar mi vida de alegrías.

A Carlos

Por enseñarme el valor de la disciplina. Por su apoyo, amor y paciencia.

AGRADECIMIENTOS

A mis profesores, por compartir sus conocimientos durante mi formación profesional.

A la gerencia del acueducto, por apoyar la realización de este proyecto.

A todas las personas que ayudaron directa e indirectamente en la realización de este proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

	Pag.
CONTENIDO	
1. RESUMEN.....	13
2. INTRODUCCIÓN.....	15
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN.....	17
4. OBJETIVOS.....	19
4.1 Objetivo general.....	19
4.2 Objetivos específicos.....	19
5. MARCO TEORICO	20
5.1 Generalidades del agua potable	20
5.2 Plantas de tratamiento de agua potable.....	21
5.2.1 Coagulación.....	21
5.2.2 Sedimentación	23
5.2.3 Filtración	24
5.2.4 Desinfección.....	24
5.3 Municipio de Santa Rosa del sur –Bolívar	25
5.3.1 Ubicación geográfica.....	25
5.3.2 Descripción Física.....	25
5.3.3 Descripción general de la planta de tratamiento de Santa Rosa del Sur.....	25
5.4 Características Y Composición De Los LTAP.....	28
5.5 Efectos tóxicos de los LTAP	29
5.6 Biosólidos	30
5.7 Clasificación de los lodos LTAP.....	31
5.7.1 Lodos aprovechables.....	31
5.7.2 Lodos no aprovechables.....	32
5.7.3 Lodos Peligrosos.....	32
5.8 Disposición final	33
5.9 Normativa sobre el tema de estudio.....	33
5.9.1 Norma internacional	37
5.10 Métodos tradicionales de deshidratación.....	38
5.10.1 Filtración al vacío	38

5.10.2	Filtración a presión	38
5.10.3	Centrifugas.....	39
5.10.4	Camas de secado	39
6.	PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS EVALUADOS EN LOS LODOS.....	40
6.1	pH.....	40
6.2	Humedad.....	41
6.3	Cenizas	41
6.4	Demanda Química de Oxígeno (DQO).....	41
6.5	Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	42
6.6	Análisis microbiológicos	42
6.6.1	Coliformes fecales y totales	42
6.6.2	Salmonella.....	42
6.6.3	Huevos de helminto	43
6.6.4	Virus entéricos	43
6.7	Metales.....	43
6.7.1	Aluminio	44
6.7.2	Arsénico	45
6.7.3	Cadmio	46
6.7.4	Cobre.....	46
6.7.5	Cromo.....	47
6.7.6	Manganeso.....	48
6.7.7	Molibdeno.....	48
6.7.8	Mercurio.....	49
6.7.9	Níquel.....	49
6.7.10	Plomo	50
6.7.11	Selenio	50
6.7.12	Fósforo	51
6.7.13	Hierro	51
6.7.14	Potasio	52
6.7.15	Zinc.....	52
7.	METODOLOGÍA	53
7.1	Análisis fisicoquímico a los lodos como materia sólida	55
7.1.1	pH.....	55

7.1.2	Determinación de la humedad del lodo y Sólidos totales	56
7.1.3	Cenizas	56
7.2	Análisis de sólidos en los lodos como materia líquida, mes de mayo.....	57
7.2.1	Sólidos totales	57
7.2.2	Sólidos suspendidos totales	58
7.2.3	Sólidos suspendidos volátiles.....	58
7.3	Demanda química de oxígeno (DQO).....	58
7.4	Demanda bioquímica de oxígeno (DBO).....	59
7.5	Determinación de metales.....	61
7.6	Análisis microbiológico.....	63
7.6.1	Coliformes fecales y totales	63
7.6.2	Huevos de helminto	63
7.6.3	Salmonella sp	63
7.6.4	Virus entéricos	64
8.	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	64
8.1	Análisis fisicoquímica de los lodos como materia sólida	64
8.1.1	Medición de pH.....	64
8.1.2	Humedad.....	66
8.1.3	Sólidos totales	68
8.1.4	Cenizas	69
8.2	Resultados para sólidos en los lodos como materia líquida	71
8.2.1	Sólidos totales	71
8.2.2	Sólidos suspendidos totales	71
8.2.3	Sólidos suspendidos volátiles.....	72
8.3	Demanda Química de Oxígeno.....	72
8.4	Demanda bioquímica de Oxígeno	74
8.5	Coliformes totales	74
8.6	Coliformes fecales.....	75
8.7	Caracterización de los niveles de metales pesados	75
9.	CLASIFICACIÓN DE ESTOS LODOS RESPECTO A SUS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS	79
10.	FORMA MÁS ADECUADA PARA LA DISPOSICIÓN FINAL DE LODOS	82
10.1	Fabricación de ladrillos.....	83
10.2	Disposición en un relleno sanitario	84

10.3	Relleno por trincheras.....	84
10.4	Relleno por áreas	85
10.1	Consideraciones Ambientales	86
11.	CONCLUSIONES	87
12.	RECOMENDACIONES	88
13.	BIBLIOGRAFÍA	89
14.	ANEXOs.....	96
14.1	Resultados análisis de laboratorio.....	96

Índice de figuras

Figura 1 Formación de lodos, PTAP de Santa Rosa del Sur	23
Figura 2 Sedimentadores, PTAP de Santa Rosa del Sur	23
Figura 3 Ubicación geográfica, Municipio de Santa Rosa del Sur –Bolívar.....	25
Figura 4 Acueducto municipio de Santa Rosa del Sur.....	26
Figura 5 Instalaciones PTAP, municipio de Santa Rosa del Sur.....	26
Figura 6 Lechos de secado PTAP Santa Rosa del Sur	27
Figura 7 Proceso manual de evacuación de los lodos.....	27
Figura 8 Almacenamiento temporal de lodos	28
Figura 9 Tanques de secado, PTAP Santa Rosa del Sur-Bolívar.....	40
Figura 10 Almacenamiento y acondicionamiento de la muestra	54
Figura 11 Preparaciones de las muestras para la determinación de metales.....	61
Figura 12 Preparaciones de las muestras para la determinación de fosforo	62

Índice de tablas

Tabla 1	Parámetros fisicoquímicos y sus valores máximos permisibles. Aguas residuales.....	35
Tabla 2	Valores máximos permisibles, biosólidos categoría A y B.	36
Tabla 3	Valores límites por la EPA Norma CFR 40 parte 503 para Biosólidos.....	38
Tabla 4	describe los procedimientos realizados	54
Tabla 5	volumen de muestra según el rango de valores de DQO.	60
Tabla 6	Resultados para la prueba de pH	65
Tabla 7	Resultados para la prueba de humedad.....	67
Tabla 8	Resultados de sólidos totales en los lodos como materia sólida	68
Tabla 9	Resultados de cenizas en los lodos como materia sólida.	70
Tabla 10	Resultados de sólidos totales en los lodos como materia líquida	71
Tabla 11	Resultados de sólidos suspendidos totales en los lodos como materia líquida.....	71
Tabla 12	Resultados de sólidos suspendidos volátiles en los lodos como materia líquida.	72
Tabla 13	Resultados de Demanda Química de Oxígeno – DQO en los lodos.....	73
Tabla 14	Resultados para Demanda bioquímica de Oxígeno – DBO de en los lodos.....	74
Tabla 15	Resultados para Coliformes totales en los lodos.....	74
Tabla 16	Resultados para Coliformes fecales en los lodos.....	75
Tabla 17	Resultados obtenidos de la determinación metales	76
Tabla 18	Micronutrientes comunes en materiales orgánicos usualmente utilizados	76
Tabla 19	resultados obtenidos de metales en las muestras de lodos analizadas para el mes de junio	77
Tabla 20	Niveles de metales pesados encontrados en los lodos como materia sólida y concentración máxima permitida según el decreto 1287/2014.	78
Tabla 21	Comparación de criterios para el uso de biosólidos según la norma EPA 503 y el decreto 1287	78

Índice de graficas

Gráfica 1 Comportamiento mensual registrado del pH	66
Gráfica 2 Comportamiento mensual registrado de la humedad.....	67
Gráfica 3 Comportamiento mensual registrado de los sólidos totales.....	69
Gráfica 4 Comportamiento mensual registrado para cenizas	70

ACRONIMO

PTAP	Planta de tratamiento de agua potable
LTAP	Lodos de tratamiento de agua potable
PAC	Policloruro de aluminio
AWWA	American Water Works Association
DQO	Demanda química de oxígeno
DBO	Demanda bioquímica de oxígeno
LÍMITES DE ATTERBERG	caracterización del comportamiento de los suelos
CI	cociente intelectual
La EPA	Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos
CFR	código de regulaciones federales

1. RESUMEN

En el presente trabajo se realizó la determinación de las propiedades fisicoquímicas a muestras de lodos presentes en la planta de tratamiento de agua potable del municipio de Santa Rosa del Sur- Bolívar.

Los análisis realizados son algunos de los establecidos por el Decreto 1287 de 2014, por el cual se establecen criterios para el uso de biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales. Así como, la resolución 0631 del 2015, por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones.

Las propiedades a determinar fueron: pH, humedad, sólidos totales, sólidos suspendidos totales, sólidos suspendidos volátiles, cenizas, demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO), aluminio, arsénico, cadmio, cobre, cromo, manganeso, mercurio, níquel, plomo, selenio, fosforo, Hierro, Potasio, zinc, coliformes totales, y coliformes fecales.

Los resultados obtenidos respecto a la caracterización de los niveles de metales pesados en las muestras de lodos analizadas, de acuerdo con el decreto 1287/2014 expedido por el ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial se encuentran por debajo de los límites máximos permisibles.

En la parte microbiológica, aun no se tienen datos de virus entéricos, huevos de helminto viables y *Salmonella sp.* Por lo que no es posible determinar si son biosólidos categoría A o B.

Los resultados mostraron que la concentración de aluminio residual, para las muestras de mayo y junio es de 69,764 g/Kg y 89,137 g/Kg respectivamente. Estas concentraciones posiblemente estén relacionadas con una dosificación inadecuada del coagulante.

En cuanto a la disposición final, como alternativas factibles, se planteó disponerlos en un relleno sanitario, o utilizarlos como sustituto parcial de la arcilla en la fabricación de ladrillos.

ABSTRACT

In this document was made the determination of the physic-chemical properties present in sludge samples of the Treatment Plant Drinking Water of the municipality of Santa Rosa of South Bolivar, Colombia.

The analyzes did are some of those established by Decree No. 1287 of 2014, which establishes the criteria for the use of bio-solids generated in treatment plants municipal wastewater. And the resolution 0631 of 2015 which establishes the parameters and maximum concentration measured in specific maximum allowable discharges to surface water and public sewer systems are established and other provisions.

The properties to be determined were: pH, moisture, total solids, total suspended solids, volatile suspended solids, ash, chemical oxygen demand - COD, biochemical oxygen demand - BOD, aluminum, arsenic, cadmium, copper, chromium, manganese, mercury, nickel, lead, selenium, phosphorus, iron, potassium, zinc, total coliforms and fecal coliforms.

The results concerning the characterization of levels of heavy metals in the sludge samples analyzed, according to the decree 1287/2014 issued by the Ministry of Environment, Housing and Territorial Development are below the maximum permissible limits.

In the microbiological part, although no data enteric virus, viable helminth eggs and *Salmonella sp.* So it is not possible to determine if they are bio-solids category A or B.

The results showed that the concentration of residual aluminum in the sludge samples for May and June 69.764 g is / Kg and 89.137 g / Kg. These concentrations are possibly related to inadequate dosing of coagulant.

As for disposal, as feasible alternatives, was raised arrange them in a landfill, or used as a partial replacement of clay in brick making

2. INTRODUCCIÓN

Las Plantas de Tratamiento de Agua Potable (PTAP), se enfocan en la obtención de una adecuada calidad de agua para la distribución de este recurso a la población y no existe un manejo adecuado de lodos generados durante este proceso. Estos lodos presentan entre otros compuestos: materia orgánica, nutrientes, metales pesados y presencia de organismos patógenos, produciéndose contaminación de los recursos naturales, como agua y suelo, al ser estos lodos dispuestos en terrenos, sin un previo tratamiento, o evacuados directamente al sistema de alcantarillado.¹

En Colombia no exista una normatividad específica que regule la caracterización, uso y destino final de los lodos provenientes de una planta de tratamiento de agua potable (PTAP). Consecuentemente, muchos de estos lodos se disponen inadecuadamente, lo que causa impactos ambientales negativos.²

La toxicidad potencial de los lodos de las plantas potabilizadoras en seres humanos y organismos acuáticos depende de diferentes factores como son: características del agua cruda, el coagulante utilizado y los posibles contaminantes removidos por el coagulante, así como las reacciones químicas que ocurran durante el proceso, el tiempo de retención del lodo en los sedimentadores. Así mismo, los lodos que tienen concentraciones elevadas de aluminio al ser vertidos a los lagos o a los ríos con una velocidad baja de caudal pueden formar sedimentos.³

Al momento de buscar una aplicabilidad para los LTAP se debe tener presente su origen, las condiciones del tratamiento y las características de la fuente de abastecimiento de agua, estos factores determinan la composición del lodo y consecuentemente sus usos. Por esta razón es importante conocer la composición del lodo para su tratamiento y disposición final.⁴ En la mayoría de los casos para los diferentes tipos de lodos después de una estabilización que permita reducir e inactivar organismos patógenos y eliminar olores desagradables, el material puede utilizarse en la fabricación de materiales de construcción, restauración de suelos degradados, operación diaria de rellenos sanitarios, y acondicionador de suelos.

¹ MARTÍNEZ CÓRDOVA, Marco Vinicio. Estudio para el tratamiento, manejo y disposición final de lodos generados en plantas de tratamiento de agua potable. Proyecto de grado ingeniero ambiental. Quito. 2012.186P

² JOYA PRADA, Adriana. Estudio del uso de los lodos generados en sistemas de tratamiento de agua potable y residual. Tesis. Especialista en Química. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ciencias. Escuela de Química. 2014.95p

³ CERÓN, Oswaldo. MILLÁN, Sandra, *et al*, aplicación de lodos de plantas potabilizadoras para elaborar materiales de construcción. [Online]. [cited 29 de marzo 2016]

⁴ JOYA Prada, Adriana. Estudio del uso de los lodos generados en sistemas de tratamiento de agua potable y residual. Trabajo de grado para optar al título de especialista en química ambiental, op.cit.p.13

A medida que los recursos hídricos se vuelven más escasos y las normas ambientales se tornan estrictas en lo relativo a disposición de residuos, nace la necesidad de realizar investigaciones orientadas a tener un mayor conocimiento sobre las técnicas que pueden utilizarse para el tratamiento de los residuos generados en los procesos industriales.⁵

⁵ Garcés Arancibia Fernando, Díaz Aguirre Juan Carlos. Acondicionamiento de lodos producidos en el tratamiento de agua potable. [online]. [cited 23 de abril 2016]-internet < <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/caliagua/mexico/02263e09.pdf>>

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

Los lodos son el material inevitable generado durante el proceso de tratamiento de agua de agua potable a partir de los coloides presentes en el agua.⁶ Igualmente, el consumo de agua ha favorecido el aumento en el número de plantas de tratamiento de agua potable y, en consecuencia, la producción de lodos⁷.

El problema de las plantas potabilizadoras, es que descargan sin previo tratamiento en una fuente superficial de agua cercana a ellas o en rellenos sanitarios, todos los efluentes que se generan en el proceso de potabilización. Los cuales, dados los procesos físico-químicos implicados en el tratamiento de agua, eventualmente presentan acumulación de metales pesados, residuos orgánicos, e inorgánicos existentes en las agua. Dichos efluentes, tienen un impacto negativo en la fuente receptora y en la población aguas abajo del punto de descarga⁸

La planta de tratamiento de agua potable PTAP del municipio de Santa Rosa del Sur-Bolívar genera diariamente lodos de desecho durante el proceso de coagulación del agua, dicho proceso es realizado con el compuesto químico Poli cloruro de aluminio.

El proceso de coagulación consiste en neutralizar la carga, generalmente electronegativa de los coloides presentes en el agua, resultando estos en condiciones aptas para formar flóculos que se acumulan en el fondo de los sedimentadores.

En general estos lodos provenientes del tratamiento de agua potable (LTAP por sus siglas) se consideran compuestos de flóculos (fase sólida) y agua (fase líquida) que forman una red tridimensional.

Para continuar la explicación del proceso llevado a cabo en la planta, los LTAP se disponen de manera directa desde los sedimentadores a través de tuberías de PVC hasta los tres lechos de secado que posee la planta. Una vez los lodos son depositados en estos lechos de secado el agua que contienen las partículas de los mismos es removida por evaporación y filtración a través de un drenaje de fondo, disponiendo la fase líquida al alcantarillado.

⁶H. El-Didamonya, Kh.A. Khalila, Mohamed Heikalb. Physico-chemical and surface characteristics of some granulated slag-fired drinking water sludge composite cement pastes, En: HBRC Journal. Abril, 2014.vol. 10,p 73-81

⁷ D. Caniani, S. Masi, I.M. Mancini, E. Trull. Innovative reuse of drinking water sludge in geo-environmental applications, En: Waste Management. marzo, 2013.vol. 33 ,p 1461-1468

⁸ GARCÍA CEBALLOS, Cristian David. Tratamiento de efluentes para la planta de potabilización de agua los cuervos en el municipio de Chinchiná. Tesis. Maestría en Ingeniería ambiental. Manizales. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería y Arquitectura. 2014.144p

Luego de este proceso natural de deshidratación los lodos restantes en estado sólido son sacados de los lechos de secado, y almacenados temporalmente en un terreno dentro de la planta, debajo de una carpa plástica adecuada de forma artesanal.

Cabe destacar que al haberse efectuado la coagulación de los LTAP con compuestos a base de aluminio estos contienen un alto contenido del metal anteriormente referido, los cuales pueden llegar a contaminar los suelos y vías fluviales cercanas.⁹ Igualmente, el efecto sobre los seres humanos de niveles elevados de aluminio se ha relacionado con importantes patologías, entre ellas el alzhéimer.¹⁰

Entre los metales existentes en los lodos, algunos en cantidades pequeñas son micronutrientes esenciales para las plantas como lo son el fósforo, hierro, manganeso, cobre y zinc. Pero otros como, arsénico, mercurio, aluminio, plomo, cromo, no lo son y pueden, a partir de una determinada concentración, resultar tóxicos para algún componente de la cadena trófica suelo-planta-animal-hombre. Es por eso que se justifica evaluar su concentración.

Adicionalmente, en Colombia no existe una normatividad específica para regular el uso y destino final de los lodos sólidos provenientes de una planta de tratamiento de agua potable (PTAP). Por esta razón, se hace necesario tomar como referencia el decreto 1287 de 2014. Por el cual, se establecen criterios para el uso de los biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales. Con el fin de conocer su composición y calidad en la búsqueda de alternativas para su disposición final amigables con el medio ambiente.

El presente trabajo tiene como objetivo presentar un análisis de la caracterización fisicoquímica de los lodos generados en la planta de tratamiento de agua potable del municipio de Santa Rosa del Sur Bolívar con el fin de establecer la clasificación de estos lodos a partir de sus características físicas y químicas. Y dados los resultados realizar recomendaciones sobre su posible disposición final.

Para dar cumplimiento a esta investigación se realizaron algunos estudios tales como pH, humedad, sólidos totales, sólidos suspendidos totales, sólidos suspendidos volátiles, Cenizas, Demanda Química de Oxígeno – DQO, Demanda Bioquímica de Oxígeno – DBO, aluminio, arsénico, cadmio, cobre, cromo, manganeso, mercurio, níquel, plomo, selenio, fósforo, hierro, potasio, zinc, coliformes totales, coliformes fecales.

⁹ VAN BENSCHOTEN, John E. EDZWALD, James K. Measuring Aluminum During Water Treatment: Methodology and Application, En: American Water Works Association. MAY, 1990. Vol. 82, No. 5 p. 71-78

¹⁰ ZHONG Lian Yang; BAO Yu Gao; QIN Yan Yue; YAN Wang. Effect of pH on the coagulation performance of Al-based coagulants and residual aluminum speciation during the treatment of humic acid-kaolin synthetic water, 2010. p. 596-603.

4. OBJETIVOS

4.1 Objetivo general.

Caracterizar fisicoquímicamente los lodos presentes en la planta de tratamiento de agua potable del municipio de Santa Rosa del sur- Bolívar.

4.2 Objetivos específicos.

- Determinar las propiedades fisicoquímicas de los lodos tales como pH, humedad, sólidos totales, sólidos suspendidos totales, sólidos suspendidos volátiles, Cenizas, Demanda Química de Oxígeno – DQO, Demanda Bioquímica de Oxígeno – DBO, aluminio, arsénico, cadmio, cobre, cromo, manganeso, mercurio, níquel, plomo, selenio, fosforo, hierro, potasio, zinc, coliformes totales, coliformes fecales
- Establecer la clasificación de estos lodos a partir de sus características físicas y químicas.
- Proponer la forma más adecuada para la disposición final de los lodos.

5. MARCO TEORICO

5.1 Generalidades del agua potable

El agua que se necesita para uso doméstico, agrícola y para procesos industriales se toma de lagos ríos y fuentes subterráneas naturales o de depósitos. El agua que llega a los sistemas de aguas municipales debe ser sometida a un proceso de tratamiento antes de ser distribuida a toma doméstica.¹¹

Es considerada agua potable, toda agua natural o producida por un tratamiento de potabilización que cumpla con las Normas de calidad establecidas para tal fin.¹²

El agua potable es esencial para los seres humanos y otros seres vivos, la calidad del agua tiene un impacto directo en la salud pública. Según la OMS, el 80% de enfermedades en el mundo son causadas por el saneamiento inadecuado, la contaminación y la falta de disponibilidad de agua limpia. Durante la última década, se ha observado que la calidad del agua subterránea ha cambiado y se está contaminado drásticamente debido a las condiciones físicas, biológicas y químicas. Como resultado de las actividades agrícolas y antropogénicas como la minería, la disposición final de los metales tóxicos, las heces humanas y animales, desechos municipales domésticos industriales y también el uso indiscriminado de quelatos metálicos pesados, fertilizantes, pesticidas y fungicidas utilizados en los procesos de la agricultura han dado lugar a deterioro de la calidad. En consecuencia ha aumentado el número de casos responsables de la mortalidad y morbilidad en gran escala causada por enfermedades transmitidas por el agua.¹³

En Colombia la norma que regula los parámetros de calidad de agua para consumo humano se rige bajo las condiciones del decreto 1575 de 2007 por el cual se establece “El Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano”.¹⁴ El cual en su artículo 35 deroga expresamente el Decreto 475 de 1998 y el artículo 52 del Decreto 1594 de 1984, con excepción de lo referente al uso agrícola de aguas servidas. Aplica a todas las personas prestadoras que suministren o distribuyan agua para consumo humano, ya sea cruda o tratada, en

¹¹ GÓMEZ Álvaro, PAYAN, Julián Alberto. Evaluación de las condiciones de dosificación de cloro en la planta de tratamiento del acueducto Cestillal. Trabajo de grado tecnólogo químico. Pereira: Universidad tecnológica de Pereira. Facultad de tecnología. Departamento de química, 2008. 99p

¹² CASTRILLÓN Daniela, Giraldo María de los ángeles. Determinación de las dosis óptimas del coagulante sulfato de aluminio granulado tipo b en función de la turbiedad y el color para la potabilización del agua en la planta de tratamiento de villa Santana. Proyecto de grado Tecnólogo Químico. Pereira: universidad tecnológica de Pereira. Escuela de tecnología química, 2012, 85 p.

¹³Hamid Iqbal, et al. Physico-Chemical Analysis of Drinking Water in District Kohat, Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan.En: International Journal of Basic Medical Sciences and Pharmacy (IJBMSp). December. 2013,Vol. 3, No. 2,p. 2049-4963

¹⁴ Colombia, MINISTERIO DE LA PROTECCIÓN SOCIAL. Decreto número 1575 (16, Mayo ,2007). Por el cual se establece el Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano.

todo el territorio nacional, independientemente del uso que de ella se haga para otras actividades económicas, a las direcciones territoriales de salud, autoridades ambientales y sanitarias y a los usuarios.¹⁵

5.2 Plantas de tratamiento de agua potable

Las plantas de tratamiento de agua potable, por lo general llevan un lineamiento en común, las cuales varían de acuerdo a la procedencia del agua cruda. Los procesos de tratamiento de agua potable convencionales consisten principalmente en la captación, coagulación, sedimentación, filtración, y desinfección.

Durante estos procesos específicamente en la coagulación y sedimentación, surgen los lodos como subproducto, resultado de la precipitación de los sólidos existentes en el agua cruda por acción, sea del paso lento del agua por tanques sedimentadores o por coagulación mediante aditivos químicos. En este proceso, algunos compuestos a base de aluminio o polímeros tales como el alumbre, cloruro de aluminio y poli cloruro de aluminio (PAC) son utilizados como coagulantes para eliminar las partículas coloidales y sustancias disueltas a través de proceso de coagulación.

En Colombia, el reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS – 2000. En la Sección II título c establece el diseño, la construcción, la supervisión técnica, y la puesta en marcha de los procesos de coagulación, sedimentación, y filtración, de las plantas de agua potable.

A continuación se describen las principales etapas de un proceso de tratamiento de agua potable.

5.2.1 Coagulación

Las aguas naturales contienen sustancias tanto disueltas como en suspensión, las cuales son orgánicas o inorgánicas, estas partículas pueden tener un tamaño y densidad tal que logran eliminarse del agua por simple sedimentación, pero algunas de ellas tienen una carga eléctrica superficial que las hace repelerse continuamente, impidiendo su aglomeración y evitando su sedimentación. Estas partículas tienen un tamaño que suele estar entre 0,2 y 1 μ m, y se denominan coloides; estas

¹⁵ MURILLO, Diana Marcela. análisis de la influencia de dos materias primas coagulantes en el aluminio residual del agua tratada. Trabajo de grado Tecnólogo Químico. Pereira: universidad tecnológica de Pereira. Escuela de tecnología química, 2011. 128p.

especies coloidales halladas en el agua cruda incluyen arcillas, sílice, hierro y otros metales pesados, además de sólidos orgánicos e inorgánicos ¹⁶

La coagulación comienza en el mismo instante en que se agregan los coagulantes al agua y dura fracciones de segundo. Básicamente consiste en una serie de reacciones químicas y físicas entre los coagulantes, la superficie de las partículas, la alcalinidad del agua y el agua misma. Debido a esto, éste proceso se efectúa en unidades de mezcla rápida donde se busca la dispersión rápida y efectiva del coagulante en el agua. Una vez ocurrida la mezcla, comienzan a aglomerarse las partículas coaguladas para convertirse luego en partículas floculantes.¹⁷

La coagulación química consiste en adicionar al agua una sustancia que tiene propiedades coagulantes, la cual transfiere sus iones a la sustancia que se desea remover, lo que neutraliza la carga eléctrica de los coloides para favorecer la formación de flóculos de mayor tamaño y peso.¹⁸

El proceso remueve sólidos, turbiedad, color, bacterias, algas y otros organismos planctónicos, fosfatos y substancias productoras de olores y sabores.

Se debe tener presente, que la coagulación es el proceso químico por el cual se añade un coagulante al agua, con el objeto de destruir la estabilidad de los coloides y promover su agregación, mientras que la sedimentación es el proceso físico de mezcla lenta, por medio del cual se incrementa la posibilidad de choque entre las partículas y por consiguiente, la formación del flóculos.

¹⁶ KEMMER, Frank N; McCallion, John. Manual Del agua, tratamiento y aplicaciones. 1 ed. México. Nalco Chemical Company. Mc Graw Hill, 1989. Pág: 8-2

¹⁷ MARTÍNEZ CÓRDOVA, Marco. Estudio para el tratamiento, manejo y disposición final de lodos generados en plantas de tratamiento de agua potable, op.cit.p.15

¹⁸ Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD [online] Lección 12. Transferencia de iones. EN:Internet: http://datateca.unad.edu.co/contenidos/358040/Contenido_en_linea_Diseño_de_Plantas_Potabilizadoras/lección_12_transferencia_de_iones.html -[cited 22 de abril 2016

Figura 1 Formación de lodos, PTAP de Santa Rosa del Sur



Fuente: propia

5.2.2 Sedimentación

Es una operación de separación de fases fluido-sólido en la que las partículas sólidas se separan del fluido debido a que por su mayor densidad, tienden a sedimentar debido a la gravedad. El proceso de clarificación y sedimentación es acelerado por tubos de sedimentación tipo colmena, los cuales tienen un ángulo de inclinación de 60° . El material con el que está construido tiene la propiedad de ser inerte al ataque químico del agua, poseer resistencia mecánica y bajo peso. Para que la sedimentación sea viable en la práctica, el tamaño de las partículas y su concentración en la suspensión deben tener unos valores mínimos, del orden de 1-10 micras y 0,2% de sólido en la suspensión.¹⁹

Figura 2 Sedimentadores, PTAP de Santa Rosa del Sur



Fuente: propia

¹⁹ GABINO, Herbert. RAMIREZ Manrique, MARIA. ROA RAMIREZ Sandy. Evaluación técnica y operativa del proceso de tratamiento de agua potable en la empresa de acueducto del municipio Yopal, Casanare. Proyecto de grado. INGENIERIA INDUSTRIAL. Yopal: Universidad Nacional Abierta Y A Distancia UNAD. Escuelas de ciencias básicas.

5.2.3 Filtración

El objetivo de la filtración es separar las partículas y microorganismos que no se eliminaron en los procesos anteriores, debido a esto, la filtración depende en gran manera de la eficiencia que tengan los procesos de coagulación, floculación-sedimentación. Según el tamaño, el tipo y la profundidad del filtro, la tasa de flujo y las características físicas del agua sin tratar, los filtros pueden extraer los sólidos en suspensión, ciertos productos químicos, sabores y olores.²⁰

Los filtros que se usan en las plantas de tratamiento convencionales son filtros rápidos de lecho granular, los cuales constan de un tanque rectangular. En este tipo de filtros, el agua fluye a través de un lecho de grava y arena, sobre un sistema de drenaje. Las propiedades del medio, causan que el agua tome caminos erráticos y largos trayectos, lo cual incrementa la probabilidad de que el sólido tenga contacto con otras partículas suspendidas, y con el medio formado en la superficie del gránulo de grava o arena, siendo de esta manera retenido entre el material filtrante.

5.2.4 Desinfección

A pesar de efectuar los procesos anteriores muchas veces los microorganismos continúan presentes en el agua, por lo que es necesario realizar una desinfección de los sistemas de abastecimiento de agua potable. La desinfección se lleva a cabo casi universalmente mediante el uso de gas cloro o compuestos de cloro (hipocloritos). Su capacidad para eliminar organismos patógenos y costo moderado los hace adecuados para la desinfección. El periodo disponible para la interacción entre el desinfectante y los componentes del agua, conocido como tiempo de contacto es muy importante para así garantizar una desinfección efectiva.²¹

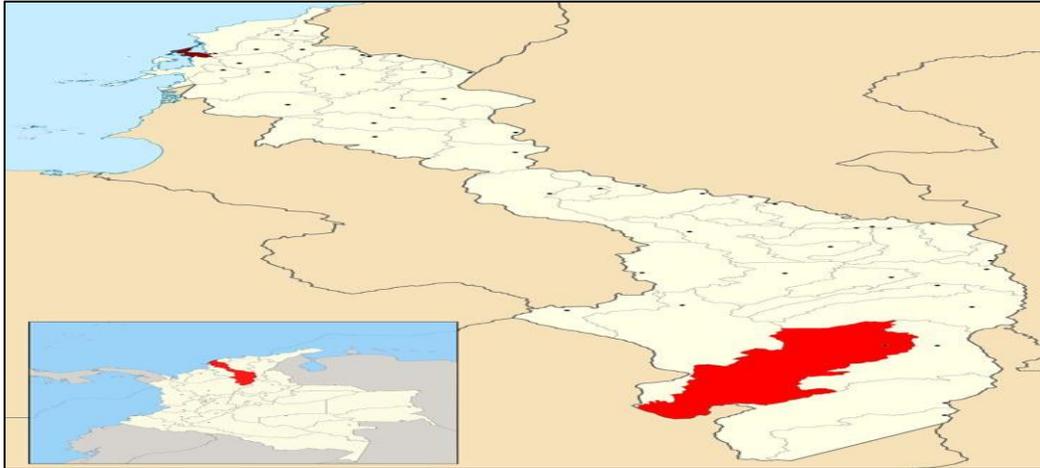
²⁰ CAÑAS ROJAS, Christian. Estudio de la aplicabilidad e implementación del policloruro de aluminio como coagulante primario en la planta la flora. Proyecto de grado ingeniero químico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías –físicoquímicas. Escuela de ingeniería Química. 2005.142p

²¹ PALENCIA SALGAR, Adriana Rocío. Diseño de una planta de purificación de agua para consumo humano en la vereda de Acapulco, municipio san juan de Girón –SANTANDER. Proyecto de grado: Ingeniera Química. Universidad industrial de Santander. Bucaramanga.2014,106p

5.3 Municipio de Santa Rosa del sur –Bolívar

5.3.1 Ubicación geográfica

Figura 3 Ubicación geográfica, Municipio de Santa Rosa del Sur –Bolívar



Fuente: Sitio web de la Alcaldía de Santa Rosa del Sur

5.3.2 Descripción Física

El municipio de Santa Rosa del Sur, está ubicado estratégicamente en el Sur del departamento de Bolívar, caracterizado por ser uno de los municipios de mayor dinamismo económico. Es un municipio del norte de Colombia, insertado en las estribaciones de la Cordillera Central, en el corazón de la Serranía de San Lucas, entre los paralelos 7° 57' 56" de latitud Norte, 74°3' 13" de latitud Oeste. Se encuentra a 650 Kilómetros de la Capital del Departamento. Limita al norte con el municipio de Morales, al sur con el municipio de Cantagallo y el Departamento de Antioquía, al oriente con el municipio de Simiti y San Pablo, y al occidente con el municipio de Montecristo.

Los habitantes se dedican especialmente a la agricultura y minería de oro.

5.3.3 Descripción general de la planta de tratamiento de Santa Rosa del Sur

La planta de tratamiento de agua potable del municipio de Santa Rosa del Sur-Bolívar dirigida por la empresa administración pública cooperativa acueducto, aseo y alcantarillado del sur- AAA sur (triple AAA). Es de tipo convencional, y su

funcionamiento es por gravedad, con una cámara de aquietamiento, floculadores, sedimentadores, y filtros.

Figura 4 Acueducto municipio de Santa Rosa del Sur



Fuente: propia

Figura 5 Instalaciones PTAP, municipio de Santa Rosa del Sur



Fuente: propia

Además, posee dentro de sus instalaciones seis lechos de secado al aire donde se da un proceso natural en que el agua contenida intersticialmente entre las partículas de lodo es removida por evaporación y filtración a través de medio de drenaje de fondo. En este sistema no es necesario adicionar reactivos ni procesos con elementos mecánicos ya que se prevé un secado lento.

Figura 6 Lechos de secado PTAP Santa Rosa del Sur



Fuente: propia

Luego de este proceso natural los lodos restantes en estado sólido son evacuados de los lechos de secado, y almacenados temporalmente en un terreno dentro de la planta, debajo de una carpa plástica.

Figura 7 Proceso manual de evacuación de los lodos



Fuente: propia

Figura 8 Almacenamiento temporal de lodos



Fuente: propia

El acueducto, cuenta con dos fuentes de abastecimiento: la quebrada la Mercedes localizada a 10 km por gravedad y el rio platanal ubicado a 3 km por bombeo.

Las características del lodo proveniente de una planta de tratamiento de agua potable dependen del origen del agua cruda y de los sistemas usados en el tratamiento del agua. Diferentes procesos de tratamiento generan diferentes tipos y volúmenes de lodo. En una planta en particular, las características del lodo pueden cambiar anual, estacional o diariamente.

5.4 Características Y Composición De Los LTAP

Los LTAP son un subproducto inevitable de la producción de agua potable. En la actualidad con el aumento de producción de estos lodos, consecuencia de la necesidad de incrementar el suministro de agua potable a poblaciones en expansión, surgen muchos problemas técnicos y económicos asociados con su disposición final, debido a la contaminación atmosférica que producen. La legislación actual clasifica los LTAP como residuos que se tratan químicamente y se deshidratan antes de su eliminación. Aunque en los últimos años se han estudiado varias alternativas para su disposición, regeneración y reutilización, la búsqueda de opciones ecológicas y rentables de uso se ha convertido en una prioridad urgente debido a estrictas regulaciones ambientales y la disminución de la aceptación pública de los vertederos.

En general, los lodos de LTAP están compuestos de varias fases que se diferencian por su estado físico y su naturaleza química. En general los LTAP se consideran compuestos de floculos (fase sólida) y agua (fase líquida) que forman una red tridimensional.²²

5.5 Efectos tóxicos de los LTAP

En el tratamiento del agua destinada al consumo humano, las sustancias en suspensión y algunas otras disueltas en esta agua, junto con los residuos de los coagulantes y otros reactivos empleados en el tratamiento, puede estar presente en exceso en los efluentes, lo que plantea de forma directa e inmediata riesgos para el medio ambiente y la salud humana.²³

Cabe agregar, que la mayoría de los organismos vivos necesita solamente de unos pocos metales, y dosis muy pequeñas, caracterizando el concepto de micronutrientes, como es el caso del zinc, del magnesio, del cobalto y del hierro. Estos metales se vuelven tóxicos y peligrosos para la salud humana cuando sobrepasan determinadas concentraciones límite. En efecto, el plomo, el mercurio y el cadmio son metales que no existen naturalmente en ningún organismo, y tampoco desempeñan funciones nutricionales o bioquímicas en microorganismos, plantas o animales²⁴

Por otra parte, lodos ricos en agentes patógenos y metales, cuando se descargan en los cursos de agua, aumenta la cantidad de sólidos en suspensión, causando finalmente que la masa de agua se enlode²⁵. En cuanto a estos residuos, aunque son principalmente inorgánicos, van formando depósitos en los tramos lentos del cauce, a la vez que aumentan la turbiedad y el color de las aguas receptoras, más aún si se está emplea carbón activado, disminuyendo la actividad fotosintética de las plantas acuáticas, planteando problemas medioambientales que hay que considerar.²⁶

²² JOYA Prada, Adriana. Estudio del uso de los lodos generados en sistemas de tratamiento de agua potable y residual. Trabajo de grado para optar al título de especialista en química ambiental, op.cit.p.13

²³ MOUNA Cherifi, BOUTEMINE Nabila. Debra F. Laefer. Effect of sludge pH and treatment time on the electrokinetic removal of aluminum from water potabilization treatment sludge, En: C. R. Chimie. (2016), P.1- 6

²⁴ MARCOS, von Sperling. Introducción a la calidad del agua y al tratamiento de aguas residuales. Traducido por Iván Andrés Sánchez Ortiz. 1 edición en español. Universidad de Nariño Colombia. Editorial universitaria, 2012, 127p.

²⁵ A.L.G. Gastaldini, et al. The use of water treatment plant sludge ash as a mineral addition. En: Construction and Building Materials 94 (2015) 513–520

²⁶ Francisco, Ramírez. Lodos producidos en el tratamiento del agua potable. [online]. Mayo-Junio. 2008[cited 27 marzo, 2016].internet < http://datateca.unad.edu.co/contenidos/358002/AVA_II-SEM2014/Unidad_2/2008_Ramirez_Francisco.pdf>.

La presencia de metales y metaloides tales como cromo arsénico, cobre, plomo, boro, y el selenio pueden tener efectos nocivos, para los microorganismos, las plantas y los animales. Más importante, estos contaminantes se bio-acumulan a través de la cadena de los alimentos, lo que lleva a la toxicidad de los seres humanos y animales. Aunque pequeñas cantidades estas sustancias son ubicuos en el medio ambiente, algunas acciones antropogénicas pueden liberar cantidades adicionales de estos materiales nocivos, a través de actividades industriales como: la minería, la eliminación de residuos, la agricultura, el uso de pesticidas y herbicidas.²⁷

Igualmente, se ha demostrado que el uso extensivo de los lodos ricos en aluminio en la agricultura puede contaminar el suelo y las vías fluviales cercanas. La forma en la que el aluminio está presente en la solución es crucial para su impacto sobre el medio ambiente.²⁸

5.6 Biosólidos

Los biosólidos son los productos resultantes de la estabilización de la fracción orgánica de los lodos generados en el tratamiento de aguas especialmente las residuales municipales, con características físicas, químicas y microbiológicas que determinaran su uso final. Dependiendo del sistema de tratamiento de aguas residuales y del manejo de los lodos generados en la planta, será la calidad de los biosólidos. La selección del proceso o sistema para la estabilización del lodo depende de varios factores, tales como: la cantidad y calidad de lodos a tratar, las condiciones particulares del sitio y la situación financiera de la empresa.

Comúnmente se suele confundir el término lodo y biosólidos. La principal diferencia radica en que el biosólidos es un lodo ya estabilizado es decir, que ha tenido un proceso de tratamiento destinado a reducir la capacidad de fermentación, atracción de vectores y patogenicidad, logrando reducir el nivel de peligrosidad y el grado de restricción para su reutilización.²⁹

En varios países, se han implementado normas con el objetivo de minimizar los riesgos asociados con el uso de los biosólidos. La norma 40 CFR parte 503 de la agencia de protección ambiental de los Estados Unidos (EPA), clasifica los

²⁷ Lu Lin, et al. Sorption of metals and metalloids from reverse osmosis concentrate on drinking water treatment solids. En: Separation and Purification Technology. (2014),v.134 P 37–45

²⁸ MOUNA Cherifi, Nabila Boutemine Debra F. Laefer, Sabir Hazourli. Effect of sludge pH and treatment time on the electrokinetic removal of aluminum from water potabilization treatment sludge, op.cit.p.29

²⁹ SATTI, Patricia. Métodos de análisis de lodos tratamiento, disposición y usos. [Online]. [Cited 23 de mayo 2016]-http://www.cofes.org.ar/descargas/relas/4_jornada/1_Curso_Metodos_Dra_Patricia_Satti_COFES-1.pdf

biosólidos de acuerdo con el contenido de patógenos indicadores en dos categorías: clase A para los que pueden ser usados sin restricciones y presentan coliformes fecales en una consideración menor de 1000 UFC/g de sólidos totales (ST), Salmonella, enterovirus <1 UFP/4g ST y huevos viables de helmintos <1/4g ST; los biosólidos clase B pueden ser usados con restricciones. La Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT contempla microorganismos indicadores similares, sin embargo, establece concentraciones menores a 10 huevos viables de helmintos/g ST para los biosólidos clase B.

En Colombia, existe el decreto 1287/2014. El cual establece parámetros y rangos, los cuales, tienen su origen y se orientan en los niveles reglamentados por la Agencia de Protección de Medio Ambiente de los Estados Unidos (EPA) por sus siglas en inglés.

Igualmente, el decreto 1287 establece que para el uso de estos biosólidos en la agricultura se debe tener un registro ante el Ica.

5.7 Clasificación de los lodos LTAP

El residuo sólido o el desecho, es cualquier objeto, material, sustancia o elemento sólido resultante del consumo o uso de un bien en actividades domésticas, industriales, comerciales, e institucionales, que el generador abandona, rechaza o entrega y que es susceptible de aprovechamiento o transformación en un nuevo bien, con valor económico o de disposición final. En principio los lodos pueden ser clasificados en tres categorías aprovechables; según la norma categoría A o categoría B, no aprovechables y peligrosos.

5.7.1 Lodos aprovechables

Son los lodos provenientes de un proceso de tratamiento que puede ser reutilizado directa o indirectamente en reciclaje, compostaje y generación de energía. La mayoría de los lodos provenientes de los procesos de tratamiento aerobios y anaerobios de las plantas de tratamiento de aguas residuales, una vez estabilizados, pueden ser utilizados como abonos, acondicionadores y restauradores de suelos.³⁰

³⁰ DONADO H, Roger. PLAN DE GESTIÓN PARA LODOS GENERADOS EN LAS PTAR-D DE LOS MUNICIPIOS DE CUMARAL Y SAN MARTÍN DE LOS LLANOS EN EL DEPARTAMENTO DEL META. CANDIDATO A MAGISTER EN GESTIÓN AMBIENTAL: PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA. FACULTAD DE ESTUDIOS AMBIENTALES Y RURALES. BOGOTÁ, AGOSTO DE 2013.

Los lodos aprovechables, según el decreto 1287 de 2014 se clasifican en: Categoría A y categoría B, de esta clasificación depende su aprovechamiento en actividades agrícolas y no agrícolas, como recuperación de suelos, actividades forestales y cobertura de rellenos sanitarios.

En cuanto a los lodos categoría A, la EPA es más específica, al denominarlos Biosólidos de Calidad Excepcional, que son aquellos que son poco contaminantes y han reducido su nivel de componentes degradables que atraen vectores. (Organismos capaces de transportar y transmitir agentes infecciosos tales como roedores, moscas y mosquitos.)

En cuanto a la categoría B, pueden recibir tratamiento, pero aún contienen niveles detectables de agentes patógenos; estos tienen restricciones al acceso público. Igualmente, pueden ser aptos para la aplicación al suelo, con restricciones sanitarias de aplicación según el tipo y localización de los suelos o cultivos. La planeación del manejo adecuado de los lodos garantiza que se apliquen biosólidos a la tierra agrícola en las cantidades y las calidades apropiadas.

5.7.2 Lodos no aprovechables

Son lodos que no tienen características aceptables para algún aprovechamiento, por ejemplo, tienen muy poca o nula carga orgánica o poder calorífico muy bajo, estos pueden ser desechados junto con los residuos sólidos de origen doméstico en rellenos municipales.³¹

5.7.3 Lodos Peligrosos

No cumple con algún(o) de los parámetros definidos para las categorías A ó B. además, de presentar características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables, infecciosas o radiactivas, puede causar riesgo a la salud humana y el medioambiente.³²

³¹ DONADO H, Roger. op. cit.,p31

³² COLOMBIA.MINISTERIO DE AMBIENTE. DECRETO 4741 DE 2005. por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y el manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral.

5.8 Disposición final

En Colombia no se dispone de leyes, reglamentos o normas específicas para lodos sólidos generados del tratamiento de agua potable. Sin embargo, el decreto 1287 de 2014, clasifica los biosólidos en categoría A y categoría B, de acuerdo con sus características físicas, químicas y microbiológicas las cuales deben ser evaluadas para determinar sus posibles usos o una adecuada disposición final.

Las normativas tienen como finalidad hacer cumplir los valores máximos permisibles permitiendo reducir el impacto ambiental en la eliminación de lodos.

Por otra parte, la eliminación en cuerpos de agua no es lo ideal, pues la legislación lo prohíbe. Igualmente, la disposición en suelos a pesar de sus ventajas agronómicas, plantean preocupaciones por los contenidos de metales pesados, que causan problemas de toxicidad humana, acuática y terrestre.³³

Esta situación ofrece el aumento en el incentivo para desarrollar opciones viables con alternativas económicas para su reutilización y reciclaje. Estas alternativas incluyen el uso de LTAP como un sustituto parcial de la arcilla en la fabricación de ladrillos. Sin embargo, la proporción de lodos debe limitarse a ser inferior a 20% realizando una previa reducción de humedad del 30%.³⁴

Igualmente, existe la necesidad de evaluar los límites de Atterberg con el fin de conocer el contenido de humedad, tamaño de partícula, plasticidad y composición mineralógica, que determinan el comportamiento de variables críticas como la resistencia a la compresión y la absorción.³⁵

5.9 Normativa sobre el tema de estudio

En Colombia no se dispone de leyes, reglamentos o normas específicas para lodos sólidos generados del Tratamiento de Agua Potable. Sin embargo, en la legislación ambiental se establece un marco normativo que en alguno de los apartes de su contenido relaciona los Lodos del Tratamiento de Agua Potable (LTAP).

³³ ZHANG, Fu-Shen, YAMASAKI, S, NANZYO, M. Waste ashes for use in agricultural production: I. Liming effect, contents of plant nutrients and chemical characteristics of some metals, En: Science of The Total Environment. 2002. vol. 284, p. 215–225

³⁴ HUANG A, Chung-Ho , WANG, Shun-Yuan. Application of water treatment sludge in the manufacturing of lightweight aggregate. En: Construction and Building Materials. 2013. vol. 43, p. 174–183

³⁵ TORRES, Patricia. Hernández, Darwin. PAREDES, Diego. Uso productivo de lodos de plantas de tratamiento de agua potable en la fabricación de ladrillos cerámicos, En: Revista ingeniería de construcción. 2012. vol. 27 no. 3, p. 145 – 154.

Lo que justifica la realización del presente proyecto, como es el caso de:

Ley 9 de 1979, Título I de la protección del medio ambiente:

Artículo 8. “La descarga de residuos en las aguas deberá ajustarse a las reglamentaciones que establezca el Ministerio de Salud para fuente receptora”.

Artículo 9. “No podrán utilizarse las aguas como sitio de disposición final de residuos sólidos, salvo los casos que autorice el Ministerio de Salud”.

El reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS – 2000. El cual en la Sección II título c, regula el manejo y tratamiento de lodos estableciendo diferentes alternativas de manejo para facilitar su disposición final.

Decreto Número 4741 De 2005: En el marco de la gestión integral, el presente decreto tiene por objeto prevenir la generación de residuos o desechos peligrosos, así como regular el manejo de los residuos o desechos generados, con el fin de proteger la salud humana y el ambiente. Este decreto en el artículo 32 numerales G y H establece las siguientes directrices:

G) La disposición o enterramiento de residuos o desechos peligrosos en sitios no autorizados para esta finalidad por la autoridad ambiental competente;

H) El abandono de residuos o desechos peligrosos en vías, suelos, humedales, parques, cuerpos de agua o en cualquier otro sitio.

Decreto 3930 de 2010. Artículo 25. No es una actividad permitida el disponer en cuerpos de aguas superficiales, subterráneas, marinas, y sistemas de alcantarillado, los sedimentos, lodos, y sustancias sólidas provenientes de sistemas de tratamiento de agua o equipos de control ambiental y otras tales como cenizas, cachaza y bagazo. Para su disposición deberá cumplirse con las normas legales en materia de residuos sólidos.

Otra referencia importante en Colombia es la **Resolución 0631 del 2015**, la cual en el artículo 15 capítulo VII establece los parámetros y límites máximos de vertimientos medidos en concentración, para Aguas Residuales Domésticas (ARD) y Aguas Residuales No domésticas (ARND).

Valores relacionados en la Tabla N°1.

Tabla 1 Parámetros fisicoquímicos y sus valores máximos permisibles. Aguas residuales

Parámetro	Unidades	
pH	Unidades de PH	6,00 a9,00
Demanda química de oxígeno (DQO)	mgO ₂ /L	150,00
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅)	mgO ₂ /L	50,00
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/L	50,00
Sólidos sedimentables (SSED)	mg/L	1,00
Grasas y aceites	mg/L	10,00
Compuestos semivolátiles fenólicos	mg/L	Análisis y reporte
Fenoles totales	mg/L	0,20
Formaldehido	mg/L	Análisis y reporte
Sustancias activas al azul de metileno(SAAM)	mg/L	Análisis y reporte
Hidrocarburos	mg/L	
Hidrocarburos totales (HTP)	mg/L	10,00
Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP)	mg/L	Análisis y reporte
BTEX(benceno, tolueno, Etilbenceno y xileno)	mg/L	Análisis y reporte
Compuestos orgánicos Halógenos absorbibles (AOX)	mg/L	Análisis y reporte
Compuestos de fósforo	mg/L	
Ortofósforos (p- PO ₄ ²⁻)	mg/L	Análisis y reporte
Fósforo total (p)	mg/L	Análisis y reporte
Compuestos de nitrógeno	mg/L	Análisis y reporte
Nitratos (N-NO ₂ ⁻)	mg/L	Análisis y reporte
Nitritos	mg/L	Análisis y reporte
Nitrógeno amoniacal	mg/L	Análisis y reporte
Nitrógeno total	mg/L	Análisis y reporte
Iones	mg/L	
Cianuro total (CN ⁻)	mg/L	0,10
Cloruros (Cl ⁻)	mg/L	250,00
Fluoruros	mg/L	5,0
Sulfatos	mg/L	250,0
Sulfuros	mg/L	1,00
Metales y metaloides	mg/L	
Aluminio (Al)	mg/L	Análisis y reporte
Antimonio	mg/L	0,30
Arsénico	mg/L	0,10
Bario	mg/L	1,00
Berilio	mg/L	Análisis y reporte
Boro	mg/L	Análisis y reporte
Cadmio	mg/L	0,01
Cinc	mg/L	3,00
Cobalto	mg/L	0,10
Cobre	mg/L	1,00
Cromo	mg/L	0,10
Estaño	mg/L	2,00
Hierro	mg/L	1,00
Litio	mg/L	Análisis y reporte
Manganeso	mg/L	Análisis y reporte
Mercurio	mg/L	0,002
Molibdeno	mg/L	Análisis y reporte
Níquel	mg/L	0,10

Plata	mg/L	0,20
Plomo	mg/L	0,10
Selenio	mg/L	0,20
Titanio	mg/L	Análisis y reporte
Vanadio	mg/L	Análisis y reporte
Otros parámetros para análisis y reporte	mg/L	Análisis y reporte
Acidez total	mg/L CaCO ₃ .	Análisis y reporte
Alcalinidad	mg/L CaCO ₃ .	Análisis y reporte
Dureza cálcica	mg/L CaCO ₃ .	Análisis y reporte
Dureza total	mg/L CaCO ₃ .	Análisis y reporte
Color real	mg/L	Análisis y reporte
Medidas de absorbancia a las siguientes longitudes de onda: 436nm, 525 nm y 620nm.		

Fuente: Resolución 0631 del 2015

DECRETO 1287 DE 2014: Por el cual se establecen criterios para el uso de los biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales.

Los metales pesados a estudiar en los biosólidos, según decreto 1287 de 2014 son: arsénico, cadmio, cobre, cromo, mercurio, molibdeno, níquel, plomo, selenio y zinc. Con referencia a lo anterior, el decreto, clasifica los biosólidos en categoría A y categoría B, y dependiendo de los resultados, plantea formas de aprovechamiento y disposición final. Tales como, actividades agrícolas y no agrícolas, recuperación de suelos, actividades forestales y cobertura de rellenos sanitarios.

Tabla 2 Valores máximos permisibles, biosólidos categoría A y B.

Parámetro	Variable	Unidad de medida	Valores máximos permisibles	
			Cat. A	Cat. B
Metales Pesados	Arsénico (As)	mg / Kg de biosólidos (Base seca)	20,0	40,0
	Cadmio (Cd)		8,0	40,0
	Cobre (Cu)		1.000,0	1750,0
	Cromo (Cr)		1.000,0	1500,0
	Mercurio (Hg)		10,0	20,0
	Molibdeno (Mb)		18,0	75,0
	Níquel (Ni)		80,0	420,0
	Plomo (Pb)		300,0	400,0
	Selenio (Se)		36,0	100,0
	Zinc (Zn)		2.000,0	2.800,0
Microbiológicos	Coliformes Fecales.	Unidades Formadoras de Colonias – UFC / g de biosólidos (base seca)	<1,00 E(+3)	< 2,00E(+6)
	Huevos de helmintos viables	Huevos de helmintos viables / 4g de biosólido (base seca)	<1,0	<10,0
		Unidades Formadoras de	Ausencia	<1,00 E(+3)

	Salmonella Sp	Colonias UFC / en 25 g de biosólidos (base seca)		
	Virus Entéricos	Unidades Formadoras de PlacasUFP / 4 g de biosólido (base seca)	<1,0	-

Fuente: Decreto 1287 de 2014

Decreto 4741 del 30 de diciembre de 2005. En el contexto colombiano, de acuerdo con el Decreto 4741 de 2005, un residuo o desecho peligroso es aquel residuo o desecho que por sus características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables, infecciosas o radiactivas puede causar riesgo o daño para la salud humana y el ambiente. Así mismo, se considera residuo o desecho peligroso los envases, empaques y embalajes que hayan estado en contacto con ellos.

El Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, por medio de la normativa; Gestión integral de residuos o desechos peligrosos: bases conceptuales. Establece opciones de tratamiento y los lineamientos que deben cumplir este tipo de desechos.

5.9.1 Norma internacional

A su vez, La EPA (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos) publicó la reglamentación concerniente a los sólidos biológicos, su uso y disposición bajo el código de regulaciones federales (CFR) parte 503 de 1993. Para la aplicación en suelo, la reglamentación ofrece límites numéricos a 10 metales, guía en la práctica de manejo, requerimientos para el monitoreo, almacenamiento de registros y su publicación.

Lodo peligroso: Presencia de contaminantes tóxicos de acuerdo a lo establecido por la EPA (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos) en sus apartados 260 y 261.

Lodo no peligroso: Las concentraciones de sus componentes son inferiores a los valores establecidos por la EPA en sus apartados 260 y 261. Los lodos no peligrosos pueden ser de Buena Calidad o de Mala Calidad según el contenido de metales pesados propuesta por la EPA

Tabla 3 Valores límites por la EPA. Código CFR 40 parte 503 para Biosólidos

Parámetro	NORMA EPA 40 CFR 503	
	Categoría A	Categoría B
Arsénico (As)	41	75
Cadmio (Cd)	39	85
Cobre (Cu)	1500	4500
Cromo (Cr)	1200	3000
Mercurio (Hg)	17	57
Molibdeno	75	No Regulado
Níquel (Ni)	30	420
Plomo (Pb)	300	840
Selenio (Se)	36	100
zinc (Zn)	7500	2800
Coliformes Fecales	< 1.00 E(+3)	< 2.00 E(+6)
<i>Salmonella sp</i>	<3/ 4g de muestra	< 2.00 E(+6)
Huevos de Helminto	<3/ 4g de muestra	< 2.00 E(+6)
Virus entéricos	Clase < 1/4	---

Fuente: Agencia de Protección Ambiental (EPA)

5.10 Métodos tradicionales de deshidratación

5.10.1 Filtración al vacío

Después de la adición de polímeros y cuando se presenta una gran concentración de sólidos inertes debe implementarse la filtración al vacío que puede secar los lodos del coagulante hasta el 20 % de sólidos. La filtración al vacío es efectiva para el secado de lodos provenientes del ablandamiento del agua.

5.10.2 Filtración a presión

Debe aplicarse para secar lodos provenientes de los procesos de coagulación-floculación y del ablandamiento del agua. Debe usarse cuando las características del lodo son difíciles de manejar ya que puede mantener los sólidos bajo presión por extensos períodos de tiempo hasta que la consistencia deseada sea alcanzada.

5.10.3 Centrifugas

La canasta centrífuga opera continuamente. Los grupos de lodos deben ser alimentados a la unidad para concentración de sólidos. Las centrifugas tienen las siguientes características: Las recuperaciones alcanzadas deben acercarse al 90 % sin polímeros y al 99 % con 0,5 a 1,0 kg de polímeros por tonelada de residuos sólidos. Las mezclas de lodos de cal y aluminio pueden llegar a una concentración de sólidos del 15 a 40%. El espesamiento de lodos de aluminio produce una concentración de sólidos del 11 % después de un ciclo de 40 minutos. Pueden concentrarse los residuos del retro lavado del filtro produciendo un 6 % de sólidos en 20 min sin polímero y un 10 % de sólidos en 80 min con polímero. La centrifugación es un proceso continuo en el cual el lodo debe alimentarse al recipiente y el pastel de lodo es exprimido y descargado mientras el flujo concentrado es retenido.

5.10.4 Camas de secado

La opción de cámaras de secado, son considerados la solución más adecuada para el tratamiento de lodos debido a su simplicidad y bajo costo de implementación. Pueden ser empleadas en plantas de gran capacidad, si se disponen de áreas para su construcción se disminuye la inversión inicial de capital. Igualmente, la mano de obra necesaria para la remoción del lodo seco, no es necesariamente calificada y puede contribuir a la ocupación de ciudadanos sin profesión.

Los lechos de secado están constituidos por tanques de pequeña profundidad, con fondo drenante. Este constituye de dos a tres capas de arena de granulometría diferente con aproximadamente 0,30 m de espesor, quedando el material más grueso abajo y el más fino arriba. El fondo es generalmente el propio suelo.

A veces este es revestido con una capa delgada de hormigón simple. Sobre el suelo es colocada una línea de drenaje, constituida por tubos cerámicos perforados o tejas de tipo colonial juntas para recolectar el líquido drenado. La superficie de la arena puede ser protegida contra pérdidas por adhesión al lodo seco, empleándose un ladrillado con juntas abiertas con 4 hasta 10 cm de ancho y rellenos con arena fina. La superficie del lecho de secado en general es levemente inclinada en forma longitudinal para que el lodo se distribuya rápidamente debido a las cargas. El ancho de los lechos de secado está entre los 3 y 6 metros, en general, pero puede sobrepasar incluso los 10 metros.³⁶

³⁶ RAIGOSA RESTREPO, Mario Alonso.op. cit., 29

Figura 9 Tanques de secado, PTAP Santa Rosa del Sur-Bolívar



Fuente: propia

6. PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS EVALUADOS EN LOS LODOS

6.1 pH

El pH indica el grado de acidez o basicidad de una solución, éste se mide por la concentración del ión hidrógeno; los valores de pH están comprendidos en una escala de 0 a 14, el valor medio es 7; el cual corresponde a solución neutra por ejemplo agua, los valores que se encuentran por debajo de 7 indican soluciones ácidas y valores por encima de 7 corresponde a soluciones básicas o alcalinas. Debido a que el pH indica la medida de la concentración del ión hidronio en una

solución, se puede afirmar entonces, que a mayor valor del pH, menor concentración de hidrógeno y menor acidez de la solución.

6.2 Humedad

El agua es el único ingrediente que está prácticamente presente en casi todas las materias conocidas, tales como orgánicas e inorgánicas y su cantidad, estado físico y dispersión en estas afectan su aspecto, olor, sabor y textura. Las reacciones químicas y las interacciones físicas del agua y de sus posibles impurezas con otros componentes de los alimentos determinan frecuentemente alteraciones importantes. Cualquier materia en general puede considerarse que está integrada por dos fracciones primarias: su materia seca y cierta cantidad de agua o humedad.³⁷

6.3 Cenizas

La incineración para destruir toda la materia orgánica de una muestra cambia su naturaleza; las sales metálicas de los ácidos orgánicos se convierten en óxidos o carbonatos o reaccionan durante la incineración para formar fosfatos, sulfatos o haluros y algunos elementos, como el azufre y los halógenos, pueden no ser completamente retenidos en las cenizas perdiéndose por volatilización. En general, las cenizas se componen de carbonatos originados de la materia orgánica y no propiamente de la muestra, la determinación debe cuidando de no sobrepasar la temperatura indicada en la metodología, pues se podrían descomponer los carbonatos presentes y se volatilizarían otras sustancias como los compuestos de fósforo produciendo resultados erróneos.³⁸

6.4 Demanda Química de Oxígeno (DQO)

La Demanda Química de Oxígeno es el método tradicional que reemplaza a los microorganismos y su uso del oxígeno. Las sustancias orgánicas e inorgánicas oxidables presentes en la muestra, se oxidan mediante reflujo cerrado en solución fuertemente ácida (H_2SO_4) con un exceso de dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) en presencia de sulfato de plata (Ag_2SO_4) que actúa como agente catalizador. Como la cantidad de dicromato que reacciona está relacionada a la cantidad de oxígeno

³⁷ VALDERRAMA PEDRAZA, Martha Lucía. Factibilidad de aprovechamiento de los lodos residuales de la PTAR del municipio de Chinavita (Boyacá). Proyecto de grado. Maestría en desarrollo sostenible y medio ambiente. Manizales, Colombia :universidad de Manizales .facultad de ciencias contables y administrativas.2013.74p

³⁸ VALDERRAMA PEDRAZA, Op. cit., p.38

necesario para consumir la materia orgánica, puede estimarse el oxígeno que se consumiría junto con la materia orgánica, en un tiempo de 90 minutos a 3 horas.³⁹

6.5 Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)

La Demanda Bioquímica de Oxígeno es la capacidad de oxígeno que requieren los microorganismos para oxidar la materia orgánica biodegradable en condiciones aerobias. En condiciones normales, esta demanda se cuantifica a 20°C, el ensayo estándar se realiza a cinco días de incubación y se conoce convencionalmente como DBO/5 se expresa en unidades de mg/L⁴⁰

6.6 Análisis microbiológicos

6.6.1 Coliformes fecales y totales

Las coliformes son una familia de bacterias que se encuentran comúnmente en las plantas, el suelo y los animales, incluyendo los humanos. La presencia de bacterias coliformes es un indicio de que el agua puede estar contaminada con aguas negras u otro tipo de desechos en descomposición. Generalmente, las bacterias coliformes se encuentran en mayor abundancia en la capa superficial del agua o en los sedimentos del fondo.⁴¹

6.6.2 Salmonella

La *salmonella* es un microorganismo que se adapta muy bien a los animales y a las personas. Cuando llega a los alimentos es capaz de multiplicarse en cualquier producto fresco a una velocidad muy elevada, ya que puede duplicar su número cada 15 ó 20 minutos si la temperatura es elevada (superior a 20° C). Sin embargo, posee una escasa capacidad de multiplicación si no existe oxígeno. La temperatura es un factor que influye de forma determinante en la aparición de *salmonella*. Los extremos no le favorecen: el frío ralentiza su crecimiento, la congelación lo detiene

³⁹ VALDERRAMA PEDRAZA, Op. cit., p.42

⁴⁰ UNAD. Op. cit., p.71.

⁴¹ RAMOS ORTEGA, LINA MARÍA. et al. ANÁLISIS DE LA CONTAMINACIÓN MICROBIOLÓGICA (COLIFORMES TOTALES Y FECALES) EN LA BAHÍA DE SANTA MARTA, CARIBE COLOMBIANO. EN: Acta biol. Colomb., 2008 Vol. 13 No. 3, p 87 – 98.

y el calor a partir de 70° C la destruye. Por otra parte, la actividad del agua afecta el crecimiento de esta, y puede sobrevivir por años en diferentes muestras.⁴²

6.6.3 Huevos de helminto

Los huevos de helminto representan uno de los grupos de mayor resistencia a diversas condiciones ambientales y, por ende, son indicadores microbiológicos de importancia en el tratamiento de aguas residuales y generación de lodos.⁴³

6.6.4 Virus entéricos

Los virus entéricos se han visto implicados en brotes de enfermedad diarreica aguda, enfermedades transmitidas por alimentos, hepatitis A y meningitis aséptica, en los que el vehículo de transmisión del agente ha sido el agua.

6.7 Metales

La capacidad toxica de los elementos químicos presenta diversas peculiaridades que pueden sistematizarse de acuerdo con su localización en el sistema periódico. La toxicidad aumenta con el carácter electropositivo y la solubilidad de los cationes metálicos, así como la existencia de enlaces covalentes en el compuesto. Por ello, dentro de cada grupo, la toxicidad crece en paralelo con el número o peso atómico.

Un mismo elemento químico muestra diferente toxicidad de acuerdo con su especie química es decir, según el estado de oxidación con el que actúa en el compuesto. Y según la naturaleza inorgánica u organometalica del compuesto del que forme parte. Los mecanismos de acción tóxica de los diferentes metales son muy diversos, y comprenden la modificación de la permeabilización de las membranas celulares, la alteración de la membranas mitocondriales con disminución del metabolismo energético, la disminución de la estabilidad de las membranas con liberación de hidrolasas acidas, la sustitución de elementos esenciales, la unión a diversos ligando, la actuación como antimetabolitos produciendo inhibición de vías enzimáticas y, en ciertos casos, su estimulación. Los metales pueden cambiar su

⁴² Ramírez Aristizábal, Luz Stella. Manual de Microbiología. Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Tecnologías, Escuela de Química.

⁴³ ORTIZ PINEDA, Carolina. prevalencia de huevos de helmintos en lodos, agua residual cruda y tratada, provenientes de un sistema de tratamiento de aguas residuales del municipio el rosal, Cundinamarca. Trabajo de grado. Magister en Ciencias Microbiología. Universidad nacional de Colombia. Facultad de ciencias BOGOTÁ, D.C., 2010.351p

estado de oxidación mediante reacciones de óxido reducción inducidas por enzimas o por otros compuestos, y con ello desencadenar un estrés oxidativo.

La interacción con proteínas origina procesos inmunitarios como inmunodepresión y alergia, y con ácidos nucleicos producen alteraciones genotóxicas y cancerígenas.⁴⁴

6.7.1 Aluminio

El aluminio es el más abundante de todos los metales y es obtenido a partir de minerales de bauxita por la producción de alúmina, que luego se funde para producir aluminio. Es ampliamente utilizado en medicina, farmacia, alimentos, la tecnología, y los cosméticos. También es un metal popular para hacer los objetos cotidianos, incluyendo utensilios de cocina y otros dispositivos asociados con la preparación de alimentos.⁴⁵

El aluminio se utiliza como coagulante en el tratamiento del agua. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud, no se deben originar residuos de coagulante en el agua potable. Sin embargo, las prácticas basadas en la optimización del proceso de coagulación con el uso de coagulantes a base de aluminio en plantas de agua potable, han derivado: 0,1 mg / L en grandes instalaciones de tratamiento de agua, y 0,2 mg / L en pequeñas instalaciones.

Como elemento perjudicial, el aluminio representa una amenaza para la salud humana a través niveles considerables, contaminación industrial y niveles terapéuticos, que afectan a los pacientes que reciben altas dosis de fármacos que contienen Al.⁴⁶

Se ha encontrado que los iones aluminosos son tóxicos para los peces, considerando niveles mayores a 0,5 mg/L. Igualmente, el efecto sobre los seres humanos de niveles elevados de aluminio se ha relacionado con importantes patologías, entre ellas el Alzheimer.⁴⁷

Por otra parte, se ha demostrado que el uso extensivo de los lodos ricos en aluminio en la agricultura puede contaminar el suelo y las vías fluviales cercanas. La forma en la que el aluminio está presente en la solución es crucial para su impacto sobre el medio ambiente.⁴⁸

⁴⁴ Rodríguez, Emilio y Mayero, Franco. Manual de toxicología básica. Madrid. Ediciones Díaz de Santos, 2000. 904 p

⁴⁵ D.R. Parker. ALUMINUM SPECIATION. En: Encyclopedia of Soils in the Environment 2005, P 50–56.

⁴⁶ Guy Berthon. Chemical speciation studies in relation to aluminium metabolism and toxicity. En: Coordination Chemistry Reviews. 1996. vol.14, P. 241-280

⁴⁷ ZHONG Lian Yang; BAO Yu Gao; QIN Yan Yue; YAN Wang. Op. cit., p.17

⁴⁸ MOUNA Cherifi, Nabila Boutemine Debra F. Laefer, Sabir Hazourli. Op. cit., p.29

6.7.2 Arsénico

El arsénico se encuentra en la naturaleza de forma ubicua, dependiendo de la geología y las características de los suelos de cada lugar. Así mismo, la contaminación por arsénico es una contaminación natural, que puede ser intensificada por las actividades humanas tales como aplicaciones de pesticidas y conservantes de la madera, la minería y las operaciones de fundición y combustión de carbón. Como consecuencia de esto, niveles elevados de arsénico han sido reportados en suelos y aguas subterráneas en todo el mundo.⁴⁹

La actividad minera es una de las principales fuentes de contaminación de muchos metales y metaloides en el suelo. Además, con la preocupante liberación de especies químicas tóxicas como el arsénico a partir de la arsenopirita asociada con el oro dentro del yacimiento.⁵⁰

La minería causa la remoción de la roca, y sin la protección de la capa vegetal la corriente de agua superficial arrastra el arsénico. Teniendo como consecuencia que estos sedimentos contaminen las aguas. Incrementando los niveles de arsénico. El problema con el arsénico es que aún en concentraciones bajas es tóxico. Al mismo tiempo, las actividades mineras pueden incrementar la velocidad de liberación de arsénico a partir de sulfuros minerales porque los exponen a procesos de meteorización durante las tareas de excavación.⁵¹

Se estima que al año se emiten 62.000 toneladas de arsénico en el mundo como subproducto de la actividad minera. Aunque, el arsénico es de origen natural, esto no significa que no sea un problema o que sea inocuo.⁵²

Consecuentemente, la OMS ha establecido una concentración máxima admisible para arsénico en agua de bebida de 10 µg/L. Además, la ingestión o inhalación involuntaria de suelos, estériles o polvo enriquecidos en arsénico también puede representar una ruta significativa de exposición a los contaminantes presentes en los residuos mineros para los humanos y otros organismos.

⁴⁹ Suiling Wang, Xiangyu Zhao. On the potential of biological treatment for arsenic contaminated soils and groundwater, En: Journal of Environmental Management. 2009.vol. 90,p.2367–2376

⁵⁰ SALAMANCA Garay, Luis Jorge. et al. Minería en Colombia Fundamentos para superar el modelo extractivista. Contraloría general de la república de Colombia.

⁵¹ Wang, S. and C.N. Mulligan. Occurrence of Arsenic Contamination in Canada: Sources, Behavior and Distribution, En: Science of The Total Environment. 2006. vol. 366(2–3),p. 701-721.

⁵² MANZANO Gutiérrez Rebeca. Selección de plantas y enmiendas para la recuperación de suelos de mina contaminados con arsénico y metales pesados. Tesis doctorado, Madrid. Universidad Autónoma de Madrid. Departamento de Química Agrícola, 2012.p363.

En primer lugar es relevante recordar y subrayar los gravísimos efectos que sobre los ecosistemas y la salud humana conlleva una movilización de arsénico desde las fases sólidas a las fases acuosas, incluyendo los fluidos biológicos. El arsénico causa efectos tóxicos agudos y crónicos, dependiendo de las concentraciones de exposición. En el hombre adulto, la dosis letal por ingestión para el arsénico inorgánico ha sido estimada en el intervalo de 1–3 mg As/kg. Las características de una toxicidad severa en humanos incluyen problemas gastrointestinales, vómitos, diarrea, hematuria, anuria, shock, convulsiones, coma y muerte. La exposición crónica oral (0,05–0,1 mg/kg) a arsénico afecta a diferentes órganos. Los efectos abarcan desde lesiones dérmicas o problemas gastrointestinales hasta cáncer de piel, vejiga, pulmón, cerebro, hígado, riñón o estómago. Los efectos sobre el sistema inmunitario también han sido descritos.⁵³

6.7.3 Cadmio

El cadmio es un metal natural una vez que se utiliza ampliamente en las industrias. Puede entrar al ambiente por las actividades naturales y antropogénicas, manteniéndose intacto durante largos períodos de tiempo. El cadmio puede ser absorbido por las plantas, peces y animales entrando en la cadena alimentaria. Los alimentos son la principal fuente de exposición al cadmio en la población general. Ciertos alimentos, como los mariscos, moluscos y algunos de hongos y granos, pueden acumular niveles elevados de cadmio. La exposición crónica al cadmio puede causar varios efectos adversos para la salud, incluyendo daño renal y afectación de huesos. La exposición significativa al cadmio en los adultos variaba entre 2,2 $\mu\text{g kg}^{-1}$ a 12,0 $\mu\text{g kg}^{-1}$ por mes en algunos países.⁵⁴

6.7.4 Cobre

El cobre es un oligoelemento esencial que se encuentra en todos los órganos y células. La química redox de este elemento hace que el cobre sea altamente adecuado como un cofactor catalítico en las enzimas oxidativas. El cobre está presente en numerosos procesos biológicos, principalmente como una parte integral de las enzimas, tales como los implicados en la respiración celular (citocromo c oxidasa), la defensa antioxidante (superóxido dismutasa), formación de tejido

⁵³ RUBINOS, David A. R. DÍAZ-FIERROS, Francisco: Potencial movilización de arsénico en los materiales geológicos y residuos mineros de Corcoesto: Una revisión crítica. 2013. En Santiago de Compostela.p21.

⁵⁴ Y. Zang, P.M. Bolger. Toxic Metals: Cadmium, En: Encyclopedia of Food Safety. 2014, vol. 2.P 346–348

conectivo (lisil oxidasa y las proteínas relacionadas), la biosíntesis de neurotransmisores (dopamina beta-hidroxilasa), péptido de la hormona de maduración (peptidil-glicina alfa-amidación de monooxigenasa), pigmentación (tirosinasa), queratinización (sulfhidrido oxidasa), y la homeostasis de hierro (ceruloplasmina y hephaestin). La ingestión de una gran cantidad de sales de cobre causa trastornos gastrointestinales. El primer síntoma es que se produzca náuseas, con un aumento al alrededor de 4 mg / L de cobre en el agua potable. En los casos graves, pueden ocurrir efectos sistémicos, especialmente hemólisis, daño hepático y renal. En contraste con los datos obtenidos después de la ingestión, se sabe relativamente poco sobre los efectos de salud relacionados con la inhalación de vapores de cobre.⁵⁵

6.7.5 Cromo

Niveles bajos de cromo (Cr) están presentes en el ambiente. Bajo las condiciones normales, la exposición al Cr no representa ningún riesgo toxicológico. Las concentraciones en el agua de río suelen estar en un rango de 1-10ug/L y no constituyen una amenaza para la salud. La ingesta diaria a través de comida varía considerablemente entre regiones. Valores típicos se extienden 50 a 200 u/día y no representan tampoco un problema de toxicidad. El cromo (III) es un nutriente esencial y es relativamente no- tóxico para hombre. Sin embargo, el Cr (VI) es un peligro para la salud de los humanos, mayoritariamente para la gente que trabaja en la industria del acero y textil. La gente que fuma tabaco también puede tener un alto grado de exposición al Cr. El Cr (VI) es conocido porque causa varios efectos sobre la salud. Cuando forma parte de productos para la piel, puede causar reacciones alérgicas, como erupciones cutáneas. Después de ser respirado el Cr (VI) puede causar irritación y sangrado de la nariz. Otros problemas de salud que son causado por el Cr (VI) son: erupciones cutáneas, malestar de estómago y úlceras, problemas respiratorios, debilitamiento del sistema inmune, daño en los riñones e hígado, alteración del material genético y cáncer de pulmón.⁵⁶

⁵⁵ ELLINGSEN, Dag G. BIRK MØLLER, Lisbeth, JAN, Aaseth. Handbook on the Toxicology of Metals, En: Toxicology of Metals. 2015.vol.2,no.4, P. 765–786

⁵⁶ MÉNDEZ, Judith Prieto, GONZÁLEZ, César A. CONTAMINACIÓN Y FITOTOXICIDAD EN PLANTAS POR METALES PESADOS PROVENIENTES DE SUELOS Y AGUA. En: Tropical and Subtropical Agroecosystems, 2009. v.10,p 29 - 44

6.7.6 Manganese

El manganeso (Mn) es uno de los elementos más abundantes de la corteza terrestre. Se encuentra en la tierra, los sedimentos, las rocas, el agua y los productos biológicos. Al menos un centenar de minerales contienen manganeso. Entre los minerales que contienen manganeso, los óxidos, carbonatos y silicatos son las formas más importantes.

En situaciones laborales, el manganeso se absorbe principalmente por inhalación. El dióxido de manganeso y otros compuestos de manganeso utilizados o producidos como subproductos volátiles del proceso de refinado del metal son prácticamente insolubles en agua. Por este motivo, sólo llegan al torrente sanguíneo las partículas suficientemente pequeñas para alcanzar el alvéolo pulmonar. Las partículas de mayor tamaño inhaladas pueden ser depuradas por las vías respiratorias y deglutidas. El manganeso también puede llegar al aparato digestivo a través de los alimentos o del agua contaminada. En la velocidad de absorción puede influir el nivel de manganeso y hierro contenido en la dieta, el tipo de compuesto de manganeso, la edad y las deficiencias de hierro. Sin embargo, el riesgo de intoxicación por esta vía no es grande. La absorción de manganeso a través de la piel puede considerarse despreciable. El exceso de metal se puede distribuir en otros tejidos, como los riñones, el intestino delgado, las glándulas endocrinas y los huesos. El manganeso se acumula en los tejidos ricos en mitocondrias y atraviesa las barreras hematoencefálica y placentaria.⁵⁷

6.7.7 Molibdeno

El molibdeno es un elemento esencial para los seres humanos, y se han establecido recomendaciones dietéticas. Los compuestos solubles del molibdeno se absorben fácilmente cuando se ingieren. Las concentraciones más altas de molibdeno se encuentran en los riñones, el hígado y los huesos. La excreción, es rápida principalmente a través la orina. La vida media biológica oscila entre unas pocas horas a unos pocos días.

En la ganadería, la intoxicación crónica de molibdeno es causada por una dieta rica en molibdeno y baja en cobre. Los síntomas incluyen anemia, trastornos gastrointestinales, trastornos óseos, y retraso del crecimiento. En animales de

⁵⁷ NORDBERG, Gunnar. METALES: PROPIEDADES QUIMICAS Y TOXICIDAD. [online]. [cited 3 de octubre]-internet <<http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/TextosOnline/EnciclopediaOIT/tomo2/63.pdf>>

laboratorio, la exposición excesiva a molibdeno puede dar lugar a cambios morfológicos y funcionales en el hígado, los riñones y bazo.⁵⁸

6.7.8 Mercurio

El mercurio se distribuye de forma natural en la biosfera, alrededor de 30.000 a 50.000 toneladas son liberadas a la atmósfera por la desgasificación de la corteza terrestre y los océanos.

Además, de las 20.000 toneladas de mercurio que son liberadas en el medio ambiente cada año a través de las actividades humanas como la combustión de combustibles fósiles y otra industrias. Aproximadamente 2.000 toneladas de mercurio se produce al año para uso industrial, una pequeña parte de la cual se utiliza para la síntesis de compuestos orgánicos de mercurio. Todas las formas de Hg inducen efectos tóxicos en las especies mamíferas, incluyendo los seres humanos. La extensión de los efectos adversos inducidos por el mercurio depende de la forma en que esté presente en el momento de la exposición, la duración de la exposición, y la vía de exposición. El metilmercurio, es la forma más dañina con efectos neurotóxicos en adultos y en fetos de madres expuestas. Los efectos tóxicos de Hg se han demostrado en el sistema cardiovascular, sistema gastrointestinal, hígado, riñones y sistema nervioso. Estudios recientes han descrito una variedad de efectos sobre células del sistema inmune incluyendo apoptosis y alteraciones en la respuesta de autoinmunidad.⁵⁹

El mercurio es considerado como uno de los diez principales productos químicos de mayor problema de salud pública por la Organización Mundial de la Salud (OMS) debido a su toxicidad y Bioacumulación en cadenas tróficas. Las actividades humanas especialmente la minería de oro y la quema de carbón, han aumentado la contaminación por mercurio de los ambientes terrestres.⁶⁰

6.7.9 Níquel

El níquel es un metal de transición relativamente abundante en la corteza terrestre. Está establecido como un nutriente esencial para las plantas y animales terrestres.

⁵⁸ JONAS, Tallkvist. OSKARSSON, Agneta. Handbook on the Toxicology of Metals, En: Toxicology of Metals. 2015. vol.2, no.4, P. 1077–1089

⁵⁹ BERLIN, Maths. ZALUPS, Rudolfs K. FOWLER, Bruce A. Handbook on the Toxicology of Metals, En: Toxicology of Metals. 2015.vol.2,no.4, P. 1013–1075

⁶⁰ Elodie Da Silvaa., Johanne Nahmanib , Emmanuel Lapiedc , Vanessa Alphonsea , Evelyne Garnier-Zarlia , Noureddine Bousserhinea. Toxicity of mercury to the earthworm *Pontoscolex corethrurus* in a tropical soil of French Guiana.En: Applied Soil Ecology.2016.vol.104, p. 79–84

Sin embargo, en concentraciones elevadas, puede ser perjudicial y afectar significativamente la fisiología de los organismos acuáticos.⁶¹

El níquel (Ni) es también un elemento esencial para el metabolismo de las plantas, aun cuando éstas requieren menos de 0,001 mg kg⁻¹ de peso seco

6.7.10 Plomo

El plomo es un contaminante natural y antropogénico. El plomo provoca una variedad de efectos adversos dependientes de la dosis. El sistema nervioso del feto y el niño son los más susceptibles. En los adultos exposición a largo plazo se asocia con un mayor riesgo de enfermedad cardíaca isquémica y el accidente cerebrovascular y una ligera elevación de la presión arterial sistólica. En los lactantes y los niños hay asociación negativa entre el cociente de desarrollo intelectual (CI) y los niveles de plomo en la sangre. Además, el plomo afecta a los microorganismos retardando la degradación de la materia orgánica. En los animales superiores afectan los glóbulos rojos, hígado y riñones, causando gran diversidad de padecimientos.⁶²

6.7.11 Selenio

El selenio es un oligoelemento esencial para muchos organismos, incluidos los humanos, pero es bioacumulativo y tóxico en niveles superiores. Tanto la deficiencia de selenio como su toxicidad son un problema. A niveles bajos, el selenio tiene importancia fisiológica, es un micronutriente esencial para los seres humanos y animales, y tiene muchas funciones importantes en la prevención del cáncer. Su concentración puede aumentar a lo largo de la cadena trófica. Cuando ciertos niveles son alcanzados, el selenio es altamente tóxico y los efectos dependen de varios factores, incluyendo el estado de oxidación del elemento. La toxicidad y beneficios de selenio son conocidos, pero los niveles específicos considerados para representar o no una amenaza para los seres humanos o el medio ambiente no están aún bien establecidos. El medio acuático puede estar contaminado por el selenio debido a la agricultura, agua de drenaje, desagüe de las minas, los residuos de la termoeléctrica, y combustibles fósiles. La agencia de Protección Ambiental (EPA) estableció 5,0 mg / L como criterio crónica de vida acuática (una estimación de la concentración más alta de selenio en el agua superficial en que una comunidad

⁶¹ Francine F. Palermo, Wagner E. Risso, Juliana D. Simonato, Claudia B.R. Martinez. Bioaccumulation of nickel and its biochemical and genotoxic effects on juveniles of the neotropical fish *Prochilodus lineatus*. En: *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2015, vol.116, p.19–28

⁶² CD, Carrington. P.M, Bolger. Toxic Metals: Lead, En: *Encyclopedia of Food Safety*. 2014, vol.2 P. 349–351

acuática puede ser expuesta de forma indefinida sin que se produzca un efecto inaceptable). Este valor se estableció en 1999 y actualmente está siendo actualizado (USEPA, 2014). En el agua potable, la OMS (Organización Mundial de la Salud) fijó provisionalmente en 40 mg /L (OMS, 2011). En la Unión Europea (UE) el límite de selenio en el agua potable es de 10 mg / L (Comisión Europea, 1998) y el nivel máximo de contaminación en los EE.UU. es 50 g / L (USEPA, 2009).⁶³

6.7.12 Fósforo

El fósforo es esencial para todos los organismos vivos ya que es uno de los componentes vitales del ADN y es el elemento clave de proveer de energía ATP. Para el ser humano, es un contribuyente fundamental al crecimiento humano y el metabolismo, jugando un papel importante en varias funciones tales como la transformación de la energía, la síntesis de aminoácidos y proteínas, la generación de vitaminas y mantenimiento de huesos y dientes, etc. En la sociedad moderna, hay un enorme consumo de fósforo en la agricultura, la industria y la alimentación humana. Indudablemente, la agricultura es, con mucho, el mayor usuario de fosfato, lo que representa 80-85% del consumo total.⁶⁴

6.7.13 Hierro

El hierro es muy abundante en la corteza terrestre. Es el segundo metal más común después de aluminio. Entre las funciones significativas de hierro en biología están el transporte, el almacenamiento y la activación de oxígeno molecular, la reducción de ribonucleótidos y dinitrógeno, la activación y la descomposición de los peróxidos y el transporte de electrones a través de portadores disueltos que abarcan una potencial redox. Por consiguiente, el hierro es necesario para el crecimiento de casi todas las células. Hombres y mujeres adultos contienen un nivel constante de aproximadamente 55 y 45 mg de hierro por kg peso, respectivamente. La hemoglobina está conformada en un 60-70% del total de hierro en el cuerpo, mientras que la mioglobina, citocromos y otras enzimas que contienen hierro

⁶³ SANTOS, Silvia. UNGUREANU, Gabriela. BOAVENTURA, Rui. BOTELHO, Cidália. Selenium contaminated waters: An overview of analytical methods, treatment options and recent advances in sorption methods. En: Science of the Total Environment, 2015. p 521–522

⁶⁴ X.H. Zhao*, Y.Q. Zhao, P. Kearney: Transformation of beneficially reused aluminium sludge to potential P and Al resource after employing as P-trapping material for wastewater treatment in constructed wetland, En: Chemical Engineering Journal, v174, 2011. p 206–212

comprenden un 10% adicional. El 20-30% restante se distribuye por igual entre las dos proteínas de reserva.⁶⁵

6.7.14 **Potasio**

El potasio es uno de los tres nutrientes minerales que necesitan las plantas en mayor cantidad, pues ayuda a mantener la permeabilidad de la célula, incrementando la resistencia de la planta a enfermedades.

6.7.15 **Zinc**

El zinc, uno de los micronutrientes esenciales para las plantas, es necesario en pequeñas cantidades. El nivel normal de zinc en el tejido foliar es de 15-60 ppm, y en el sustrato de 0,10-2,0 ppm.

Es un micronutriente ubicuo, esencial para la vida, y tóxico en exceso. Cuando las dietas proporcionan cantidades adecuadas de Zn biodisponible y la ingesta de otros nutrientes se mantiene una adecuada homeostasis. La toxicidad de zinc es más común después del consumo excesivo de suplementos dietéticos que contengan Zn por encima de lo habitual.

El zinc se introduce en la cadena alimentaria a través de las plantas y animales. El zinc liberado en el medio ambiente se diluye, y con el tiempo forma compuestos insolubles en entornos alcalinos. Los suelos agrícolas comúnmente tienen bajo contenido de zinc disponible, fenómeno de gran importancia para la producción vegetal y para la salud de los herbívoros que viven en áreas de Zn limitado.⁶⁶

⁶⁵ M. Fontecave, J.L. Pierre. Iron: Metabolism, toxicity and therapy, En: Biochimie. Volume 75, Issue 9, 1993, P 767-773

⁶⁶ SANDSTEAD, Harold H. Handbook on the Toxicology of Metals, En: Specific Metals 2015. vol.2, no.4,

7. METODOLOGÍA

Área de Estudio: La toma de muestras se realizó en el acueducto del municipio de Santa Rosa del Sur Bolívar. Debido a que la planta de tratamiento del municipio no cuenta con un laboratorio especializado donde se puedan realizar análisis especializados, los parámetros fueron estudiados en el laboratorio de control de calidad de la Universidad de Pamplona, Universidad Industrial de Santander y laboratorio SIAMA LTDA.

Tiempo de investigación: El tiempo empleado para la elaboración de este proyecto fueron 6 meses.

Muestras: se recolectaron tres muestras por mes, para enero, febrero, marzo, abril y mayo, y una muestra puntual para el mes de junio. Las muestras de enero y febrero se recolectaron, de los lodos ya presentes en un terreno dentro de la planta, y los lodos de marzo, abril, mayo y junio, directamente de los lechos de secado.

Las muestras fueron almacenadas en bolsas resellables y botellas plásticas según el estado físico en que se encontraban.

Las muestras de enero, febrero, marzo y abril una vez recolectadas fueron conservadas en una nevera a 4°C ⁶⁷ dentro de las instalaciones del acueducto, hasta la realización de los análisis en el mes de mayo.

Cantidad de la muestra: De cada una de las muestras se tomaron 500 g de muestra.

Transporte de la muestra: Se transportaron a una nevera portátil con abundante cantidad de hielo a 4°C y así hasta llegar a los laboratorios.

El objetivo de la preparación fue homogeneizar la muestra de lodo para ser usada en los análisis químicos y físicos, normalmente, los lodos tienen una humedad que puede dificultar la obtención de una muestra representativa. Por esta razón, las muestras debieron secarse, el secado se realizó en un horno a una temperatura de 40°C, durante 12h y trascurrido este tiempo las muestras se molieron con un motero hasta que pasaron por un tamiz de 2 mm de apertura.

Nota: las muestras de lodos designadas para pruebas de humedad, cenizas, y análisis microbiológicos no se sometieron al proceso de secado.

⁶⁷ ZAGAL, Erick. Sadzawka Angélica. PROTOCOLO DE MÉTODOS DE ANÁLISIS PARA SUELOS Y LODOS.[online].[cited 25 de mayo] – internet < http://www.cofes.org.ar/descargas/relas/4_jornada/Protocolos_suelos%20y_lodos_Sadzawka.pdf>

Figura 10 Almacenamiento y acondicionamiento de la muestra



Fuente: autor

Tabla 4 describe los procedimientos realizados

Muestreo	Parámetros analizados
Enero Lodos como materia solida	Los parámetros pH, humedad, sólidos totales, cenizas, Demanda Química de Oxígeno, Demanda Bioquímica de Oxígeno, cobre, manganeso, plomo, fosforo, hierro, potasio, zinc, coliformes totales, coliformes fecales. Fueron medidos en el laboratorio de control de calidad de la Universidad de Pamplona.
Febrero Lodos como materia solida	pH, humedad, sólidos totales, cenizas, Demanda Química de Oxígeno, Demanda Bioquímica de Oxígeno, cobre, manganeso, plomo, fosforo, hierro, potasio, zinc, coliformes totales, coliformes fecales. Fueron medidos en el laboratorio de control de calidad de la Universidad de Pamplona.
Marzo Lodos como materia solida	pH, humedad, sólidos totales, cenizas, Demanda Química de Oxígeno, Demanda Bioquímica de Oxígeno, cobre, manganeso, plomo, fosforo, hierro, potasio, zinc, coliformes totales, coliformes fecales. Fueron medidos en el laboratorio de control de calidad de la Universidad de Pamplona.
Abril Lodos como materia solida	pH, humedad, sólidos totales, cenizas, Demanda Química de Oxígeno, Demanda Bioquímica de Oxígeno, cobre, manganeso, plomo, fosforo, hierro, potasio, zinc, coliformes totales, coliformes fecales. Fueron medidos en el laboratorio de control de calidad de la Universidad de Pamplona.

Mayo Lodos como materia solida	pH, humedad, sólidos totales, sólidos suspendidos totales, cenizas, Demanda Química de Oxígeno, Demanda Bioquímica de oxígeno, cobre, manganeso, plomo, fosforo, hierro, potasio, zinc, arsénico, mercurio, selenio, aluminio, cadmio, coliformes totales, coliformes fecales.
Mayo Lodos como materia liquida	pH, sólidos totales, sólidos suspendidos totales, sólidos suspendidos volátiles, Demanda Química de Oxígeno, Demanda Bioquímica de Oxígeno, cobre, manganeso, plomo, fosforo, hierro, potasio, zinc, coliformes totales, coliformes fecales.
Junio	arsénico, mercurio, selenio, cadmio, molibdeno, cromo, zinc, cobre, plomo, níquel y aluminio

Elaboración: propia

Como se observa en la tabla N° 4. Los parámetros aluminio, arsénico, cadmio, molibdeno, mercurio y selenio. No fueron medidos para los meses de enero, febrero marzo y abril. Pues el laboratorio de control de calidad de la universidad de pamplona, no cuenta con las lámparas necesarias para que el equipo de absorción atómica realice la determinación de estos metales. Por otra parte, a la muestra de mes de mayo se le realizaron todos los análisis propuestos en los objetivos, a excepción de molibdeno, y a la muestra del mes de junio solo los parámetros de metales a medir según el decreto 1287, además de aluminio.

La determinación de los metales; arsénico, mercurio, selenio, aluminio, y cadmio, en la muestra solida del mes de mayo se realizó en el laboratorio SIAMA LTDA. Igualmente, los metales, arsénico, mercurio, selenio, cadmio, molibdeno, cromo, zinc, cobre, plomo, níquel y aluminio, de la muestra del mes de junio, se realizaron en los laboratorios de la universidad industrial de Santander UIS.

7.1 Análisis fisicoquímico a los lodos como materia sólida

7.1.1 pH

La evaluación del pH en cada una de las muestras, se realizó utilizando el método EPA 9045 D (Environmental Protection Agency). Como se describe a continuación: Se pesaron 20 g de lodo, agregando 20 mL de agua destilada a una temperatura entre 20°C y 25°C, usando el agitador magnético se agitó vigorosamente la suspensión durante 5 min, dejando reposar por 2 h. trascurrido este tiempo se

introdujo el electrodo. Una vez estabilizada la lectura se anotó el valor con dos decimales.

El análisis se realizó por triplicado para cada muestra.

7.1.2 Determinación de la humedad del lodo y Sólidos totales

La determinación de la humedad del lodo se llevó a cabo mediante la evaporación del agua contenida en las muestras, de acuerdo a lo establecido en la norma NTC 1495. La cual se describe a continuación.

Se colocaron los crisoles en una mufla a 500°C por 1/2 hora, trascurrido este tiempo, inmediatamente se pasaron al desecador durante una hora. A continuación, se agregó 10 g de lodo a cada uno de los crisoles. Posteriormente fueron introducidos al horno manteniéndolo a 105°C durante 24 horas. Con el fin del que la muestra alcanzara un peso constante. Trascurrido este tiempo las cápsulas fueron trasladadas a un desecador para que no adquieran humedad nuevamente mientras se enfriaban. La fracción remanente corresponde al contenido de sólidos totales y la fracción evaporada, al contenido de humedad.

El análisis se realizó por triplicado para cada muestra.

Para obtener los resultados se realizaron los siguientes cálculos

$$\% \text{ Humedad} = \frac{\text{peso de la muestra húmeda} - \text{Peso de la muestra seca}}{\text{Peso de la muestra húmeda}} * 100\%$$

Ecuación 1. Cálculo para la determinación humedad

7.1.3 Cenizas

En la determinación de cenizas el agua y sustancias volátiles son evaporadas, mientras que las sustancias orgánicas son incineradas en presencia del oxígeno del aire para producir dióxido de carbono y óxido de nitrógeno. La determinación de cenizas, se basa en la pérdida de peso que sufre la muestra después de someterse a un proceso de calentamiento a 550°C y se debe hacer un tratamiento previo del material, en este caso los crisoles donde se introducirá la muestra se deben tarar, lo que consiste secar los crisoles con tapa en la mufla por ½ horas a 500°C.

Para la determinación de cenizas se pesó 1g de muestra en un Crisol previamente tarado, llevándolo a la Mufla por aproximadamente 3 horas haciendo un escalonamiento en la temperatura desde una inicial de 150°C y final de 550°C por 3 horas, se llevan después a un desecador mientras se enfriaron hasta obtener peso constante, y finalmente se pesaron para estimar el cálculo con la siguiente fórmula⁶⁸

Calculando cenizas como

$$\% \text{ de Cenizas} = \frac{\text{peso de crisol con las cenizas} - \text{peso del crisol vacío}}{\text{peso de la muestra}} * 100$$

Ecuación 2. Cálculo para la determinación de cenizas

7.2 Análisis de sólidos en los lodos como materia líquida, mes de mayo

La determinación de sólidos en la muestra, se realizó de acuerdo al *STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER*. Método 2540

7.2.1 Sólidos totales

Se calentó la capsula en una mufla a 500°C por 1/2hora. Enfriándose en un desecador registrando el peso, a continuación se agito la muestra para homogeneizarla, posteriormente se midieron 10 ml de muestra y se adicionaron en la capsula, evaporando el agua en una plancha de calentamiento, luego fue llevada a la estufa a 105°C por 1 hora, al cabo de la cual se enfrió en un desecador y se pesó.

Calculando los sólidos totales como

$$\text{Sólidos totales (mg/l)} = \frac{w_2 - w_1}{v_1} * 1000$$

Ecuación 4. Cálculo para la determinación de sólidos totales

⁶⁸ GALVIS TORO, juliana. RIVERA GUERRERO, XIMENA. caracterización fisicoquímica y microbiológica de los lodos presentes en la planta de tratamiento de aguas residuales industriales (PTARI) de la empresa jugos hit de la ciudad de Pereira. trabajo de grado. Tecnólogo en Química. PEREIRA: Universidad tecnológica de Pereira. facultad de tecnologías .escuela de química. 2013.101p

Donde

W1= peso de la capsula de porcelana

W2= peso de la muestra + peso de la capsula de porcelana después del calentamiento en la estufa 105°C por 1 hora

V1= volumen de la muestra en litros

7.2.2 Sólidos suspendidos totales

Procedimiento: La capsula con su respectivo filtro se llevó a la mufla a 500°C por 1/2hora. Luego se pasó a la estufa a 105°C durante una hora. Por último, se colocó en el desecador hasta temperatura ambiente procediendo a pesar (w4). En seguida se filtraron 20 mL de la muestra (v2), posteriormente el residuo del filtro fue secado a 105°C por una hora, cumplido este tiempo se enfrió en el desecador, y se pesó (w5).

$$\text{Sólidos suspendidos (mg/l)} = \frac{w5-w4}{v2} * 1000$$

Ecuación 5. Cálculo para la determinación de sólidos suspendidos totales

Donde

W4= peso de la capsula de porcelana + papel filtro.

W5= peso de la muestra + peso de la capsula de porcelana después del calentamiento en la estufa 105 ° C por 1 hora

V2= volumen de la muestra en litros

7.2.3 Sólidos suspendidos volátiles

Se tomó el crisol con la muestra anterior y se colocó en una mufla previamente calentada a 550 °C durante ½ hora. Pasándolo luego a la estufa a 105 °C por 20 minutos. Se enfrió en el desecador hasta peso constante y se pesó registrando el peso como w6

$$\text{Sólidos volátiles (mg/l)} = \frac{w5-w6}{v(L)} * 1000$$

Ecuación 6. Cálculo para la determinación de sólidos suspendidos totales

7.3 Demanda química de oxígeno (DQO)

Se realizó por triplicado para cada muestra según el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Método 5220 A.

Los estándares se preparan de la siguiente forma descrita a continuación

Solución de digestión: A 500 mL de agua destilada agregar 10.2160 g de $K_2Cr_2O_7$, grado estándar primario, previamente secado a $103^\circ C$ durante 2 horas, 167 mL de H_2SO_4 concentrado y 33 g de $HgSO_4$. Disolver, enfriar a temperatura ambiente y diluir a 1000 mL.

Reactivo de ácido sulfúrico: Se pesan 5.06 Ag_2SO_4 , grado reactivo o técnico, cristales o en polvo, y se diluye hasta 500 ml con H_2SO_4 concentrado. Dejar en reposo de 1 a 2 días para que se disuelva el Ag_2SO_4 .

A continuación

Se pesó 1 gramo de muestra sólida y se aforó a 100 mL.

Se lavaron los tubos y sus tapas con agua de chorro, luego con una solución de ácido nítrico, y por último se enjuagaron bien con agua destilada.

Con una micro-pipeta, se midió en los tubos 2,5 mL de muestra, agregando 1,5 mL de solución de digestión. Adicionando cuidadosamente 3,5 mL reactivo de ácido sulfúrico por la pared del tubo de tal manera que se formó una capa de ácido debajo de la mezcla de muestra y solución digestora. Se taparon herméticamente los tubos, invirtiéndolos varias veces para mezclar completamente el contenido.

A continuación, se colocaron los tubos en el bloque de calentamiento a $150^\circ C$ y se dejaron en reflujo durante 2 horas. Enfriando hasta temperatura ambiente.

Se determinó la DQO en el espectrofotómetro HACH DR/2010 insertando el método 961 a una longitud de onda de 620nm, primero se introdujo el tubo con el blanco para dar auto cero y luego el tubo que contenía la muestra, el espectrofotómetro muestra el resultado en unidades de mgO_2/L .

7.4 Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)

Se realizó para cada muestra según el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Método 5210 A.

Este método se determinó a partir del equipo de OXITOP que está constituido por un frasco oscuro dotado de un tampón electrónico en el que es posible leer el contenido de oxígeno en mgO_2/L a través de un factor dependiente de volumen de muestra según el rango de DQO, como se muestra en la tabla N° 5

Tabla 5 volumen de muestra según el rango de valores de DQO.

Volumen de la muestra (ml)	Rango de medida de la DQO(mg o₂/l)	Factor
432	0-40	1
365	0-80	2
250	0-200	5
164	0-400	10
97	0-800	20
43.5	0-2000	50
22.7	0-4000	100

Se pesaron 5 gramos de la muestra de lodos y se aforaron a 500mL.

A continuación, se adicionó a cada botella el volumen de la muestra dependiendo del valor de medida de DQO, según la tabla anterior. Seguidamente se colocó en la cestilla de goma que se adapta a la boca del frasco dos lentejas de NaOH para retener el CO₂ generado. Por último, se colocaron dos gotas de inhibidor de nitrificación (ATH).

Nota Las bacterias nitrificantes consumen también oxígeno. Este consumo puede presentarse dentro de los primeros cinco días, especialmente en el caso de muestras con valores DBO reducidos. En la determinación de la DBO normalmente no debería determinarse el consumo de oxígeno de nitrificantes. Con el inhibidor de nitrificación puede suprimirse la actividad de estas bacterias mediante inhibición enzimática, de manera que la DBO resulte sólo de la degradación de sustancias orgánicas.

Se procedió a cerrar la botella, para iniciar el sistema de medida presionando simultáneamente S y M hasta que apareció 00, y se colocó la botella dentro de la estufa de aclimatación para mantener la temperatura a 20°C el sistema inicia el computo interno del tiempo.

El valor obtenido del día 5 se multiplica por el factor correspondiente al rango de medida tomado y ese valor es el valor de la DBO₅ en mgO₂/L

7.5 Determinación de metales

Se realizó según APHA Method 3111: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. De acuerdo al método empleado por el laboratorio de control de calidad de la Universidad de Pamplona.

Los metales determinados en el laboratorio de control de calidad de la Universidad de Pamplona fueron los siguientes: Cobre, cromo, manganeso, níquel, plomo, fosforo, hierro, potasio, zinc.

Para la determinación de los metales referidos anteriormente, se realizó el procedimiento descrito a continuación.

Extracción ácida

La digestión ácida se llevó a cabo con ácido clorhídrico y ácido sulfúrico (solución extractora) para lograr la oxidación completa y reducir las interferencias causadas por la materia orgánica.

- Se pesaron 5 gramos de la muestra seca, macerada y homogenizada. A continuación, a cada muestra se le adicionó 25 mL de solución extractora. Procediendo a agitar la muestra.
- Se dejó reposar por unas horas, procediendo a filtrar. La muestra filtrada fue guardada en balones aforados en la nevera hasta su medición. Empleando un espectrofotómetro de absorción atómica SHIMADZU AA

Figura 11 Preparaciones de las muestras para la determinación de metales





Fuente: propia

Determinación de fósforo

Se determinó fósforo mediante espectrofotometría, según lo descrito por el IGAC.

Para determinar el contenido fósforo de en las muestras primero se llevó a cabo una extracción de la muestra mediante una solución extractora de bicarbonato de sodio 0.5M de la siguiente forma: se procedió a pesar 2 g de lodo adicionándole 10 mL de una solución de bicarbonato de sodio 0,5M, procediendo a agitar la muestra después se filtró. Una vez extraída la muestra se analizó con el espectrofotómetro HACH DR/2010

Figura 12 Preparaciones de las muestras para la determinación de fosforo



Fuente: propia

7.6 Análisis microbiológico

7.6.1 Coliformes fecales y totales

Para la determinación de este tipo de microorganismos se toman 10g de la muestra y se llevan a un frasco tapa azul que contiene 90mL de APE (Agua Peptona Estéril), esto se homogeniza durante 10 minutos aproximadamente, se conoce como Solución Madre, de esta mezcla se toma 1mL, se llevan a un tubo de ensayo tapa rosca que contiene 9 mL de APE y se homogeniza nuevamente y se conoce como Dilución 1/10, seguidamente de esta mezcla se toma 0.1mL se llevan a un tubo de ensayo tapa rosca que contiene 9.9 mL de APE y se homogeniza nuevamente y se conoce como Dilución 1/100. Después de tener la Solución Madre y las Diluciones preparadas se procede a la siembra de cada una de estas por triplicado en Caldo Fluorocult LMX, la cantidad de muestra sembrada es de 1mL y el periodo de incubación es de 48 horas a 37°C. Para este tipo de microorganismos la siembra realizada es en tubos de ensayo tapa rosca donde se encuentran 10mL del medio de cultivo y Campanas de Durham en cada uno de ellos en estos se agrega los 1mL de muestra para sembrar, el uso de las Campanas de Durham es para observar la capacidad de dichos microorganismos de fermentar la lactosa con la producción de ácido y gas, con estos se identifica la presencia de Coliformes Totales.⁶⁹

7.6.2 Huevos de helminto

Método para la cuantificación de huevos de helmintos en lodos y biosólidos. Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, Protección ambiental - Lodos y biosólidos - Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final.⁷⁰

7.6.3 Salmonella sp

Para la determinación de este tipo de microorganismos se debe cumplir con tres etapas: Pre-enriquecimiento, Enriquecimiento y Siembra de la muestra. Se pesan 25g de la muestra y se llevan a un Erlenmeyer que contiene 225mL de Caldo Lactosado, medio de cultivo empleado para el pre-enriquecimiento de la muestra, tener esto en un baño maría a 60°C por 1 hora. Se toma 1mL de esta mezcla y se

⁶⁹ GALVIS TORO, juliana. RIVERA GUERRERO, XIMENA. op,cit p64

⁷⁰ ORTIZ PINEDA, Carolina. op. cit., p42.

lleva a un tubo de ensayo tapa rosca que contiene 9mL de Caldo Selenito Cistina CSC, medio de cultivo usado para el enriquecimiento de la muestra, esto se incuba durante 24 horas a 37°C. Transcurrido el periodo de incubación se toman 0.1mL y se siembra por Superficie en Agar Xilosa Lisina Desoxicolato XLD y en Agar Shiguella – *Salmonella*, medios de cultivo selectivos para el crecimiento de *Salmonella Sp*, se incuba por 24 horas a 37°C. Después de la incubación se revisan las cajas si se observan en cualquiera de los dos medios de cultivo, colonias negras, se aíslan y se siembran en agar triple azúcar hierro TSI, medio de cultivo usado para el aislamiento e identificación de la *Salmonella sp*, igualmente por superficie y con una incubación de 24 horas a 37°C. 61 las colonias negras son las consideradas como típicas y presuntivas relacionadas con la *Salmonella sp*. Los tiempos y temperaturas de incubación deben respetarse, ya que de lo contrario podría ocasionar falsas sospechas de la presencia de este tipo de microorganismos, es por esto que se realiza en tres etapas la identificación del mismo. La lectura de estos microorganismos, se basa en el principio de recuento, es decir, después de transcurrido el tiempo de incubación se cuenta el número de colonias formadas.⁷¹

7.6.4 Virus entéricos

La presencia de virus entéricos se determino mediante RT-PCR (Reacción en Cadena de la Polimerasa con Transcriptasa Reversa). Técnica de laboratorio comúnmente usada en biología molecular para generar una gran cantidad de copias de ADN, proceso llamado "amplificación".

8. RESULTADOS Y ANÁLISIS

8.1 Análisis fisicoquímica de los lodos como materia solida

8.1.1 Medición de pH

El pH óptimo debe estar entre 6,0 – 9,0 unidades según se ve referenciado en la Resolución 0631 del 2015.

En cuanto al pH; este es un factor muy importante en los sistemas químicos y biológicos de las aguas naturales. El valor del pH compatible con la vida biológica

⁷¹ GALVIS TORO, juliana. RIVERA GUERRERO, XIMENA op. cit., p64

está comprendido entre 6 y 9. Sin embargo, para la mayoría de las especies acuáticas, la zona de pH favorable se sitúa entre 6.0 y 7.2.

Se realizó la determinación de pH a cada una de las muestras analizadas. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 6.

Tabla 6 Resultados para la prueba de pH

Mes	Muestreo	Promedio mensual	Desviación estándar
Enero	1	7,41	0,46
	2		
	3		
Febrero	1	7,19	0,22
	2		
	3		
Marzo	1	7,24	0,33
	2		
	3		
Abril	1	7,37	0,39
	2		
	3		
Mayo	1	7,27	0,5
	2		
	3		

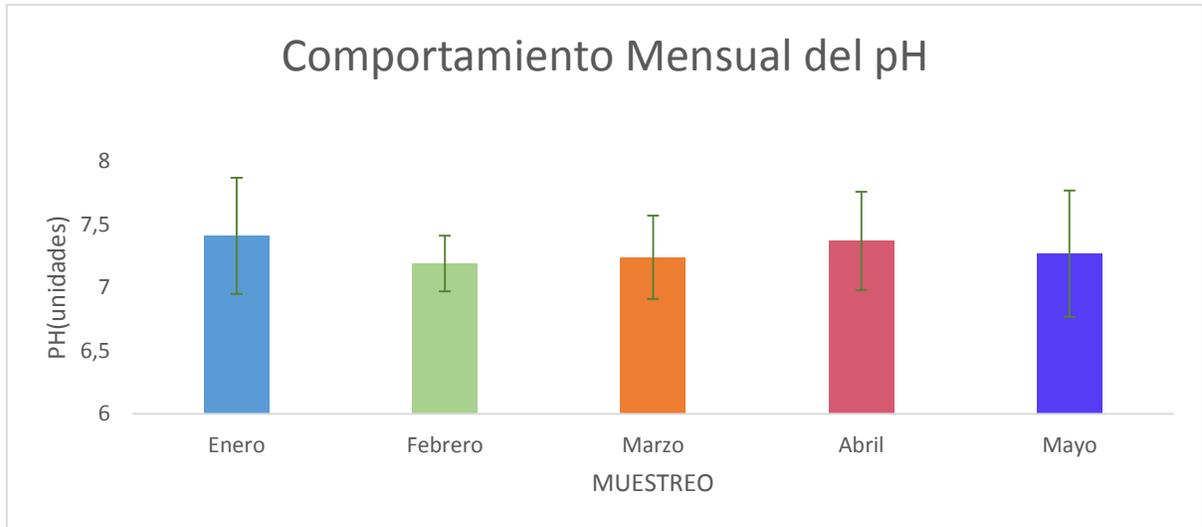
Fuente: propia

Como se observa en los resultados obtenidos en la tabla N° 6; el pH permanece razonablemente constante durante los meses de estudio. Esto se debe a que el pH en el sistema no cambia a menos que la calidad del agua cambie debido a influencias de tipo natural o antropogénicas especiales.

Los valores obtenidos indican que estos residuos cumplen con la norma para el parámetro corrosividad ($pH < 2$ $pH > 12,5$).

Para una visualización más fácil de los datos se presenta el siguiente diagrama de barras.

Gráfica 1 Comportamiento mensual registrado del pH



Fuente: propia

8.1.2 Humedad

Una de las características físicas más importantes de los lodos residuales es el contenido de humedad, debido a que este valor está relacionado con el volumen a mayor humedad aumenta el cuerpo del lodo y hace más difícil su manejo y almacenamiento. Generalmente, los lodos producto del tratamiento del agua cruda tienen un 80% de humedad.

Según la Norma Técnica Colombiana 5167: Productos para la Industria Agrícola, Productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas de suelo. El contenido de humedad para abonos orgánicos es máximo está entre 15 y 20 %. Es deseable este contenido de humedad en el producto final, con la propósito de facilitar las operaciones de almacenaje, igualmente con un mayor grado de secado del producto final durante la etapa de maduración se controla la proliferación de agentes patógenos.

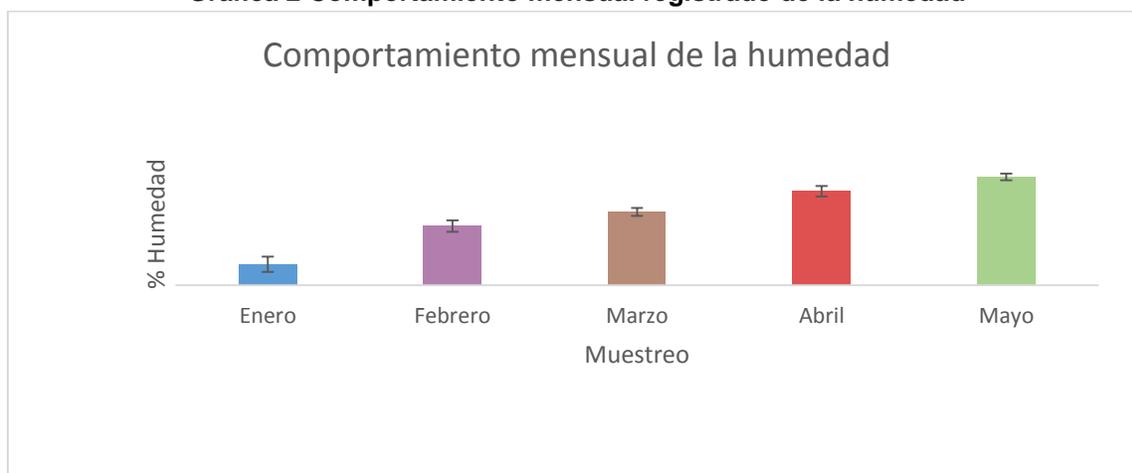
Se realizó la determinación de humedad. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 7.

Tabla 7 Resultados para la prueba de humedad

Mes	Muestreo Triplicado	Promedio mensual	Desviación estándar
Enero	1	15,47	5,73
	2		
	3		
Febrero	1	43,68	4,24
	2		
	3		
Marzo	1	54,29	2,86
	2		
	3		
Abril	1	69,59	3,89
	2		
	3		
Mayo	1	80,18	2,43
	2		
	3		

Fuente: propia

Gráfica 2 Comportamiento mensual registrado de la humedad



Fuente: propia

Según se observa en los datos promedio, obtenidos en la tabla N° 7. Hay un cambio importante en el porcentaje de humedad respecto de cada mes, esto se debe a que las muestras de enero y febrero se recolectaron fuera de los lechos de secado, donde se encontraban almacenados los lodos al aire libre, lo que eventualmente produjo una evaporación del agua contenida, causada por la acción prolongada a

rayos solares en ausencia de lluvia que predominó en este período del año. Por otro lado, la muestra correspondiente a los meses de abril y mayo, corresponde a lodos frescos recolectados de los lechos de secado, con un proceso de deshidratación muy bajo; el cual se refleja en el porcentaje de humedad.

Se puede decir respecto a esto, que los lodos presentan una deshidratación aceptable, influenciada y limitada por los factores climáticos. Como la temperatura, además del tiempo al cual se sometan al proceso de deshidratación. El grado de deshidratación es importante, pues permitirá reducir la extensión de terreno requerido por la empresa para su disposición final.

Según la AWWA (*American Water Works Association*), el grado de deshidratación necesario para una planta dada, dependerá del método de disposición final. La concentración mínima normalmente aceptable puede ser de 20%, sin embargo, esto dependerá de que las instalaciones estén correctamente diseñadas para remover aproximadamente del 80 al 90% de la humedad.

8.1.3 Sólidos totales

Los análisis de sólidos son importantes en el control de procesos de tratamiento biológico y físico de aguas residuales, y para evaluar el cumplimiento de las limitaciones que regulan su vertimiento.

Es la cantidad de materia que permanece como residuo después de una evaporación, entre 103 y 105 grados centígrados; de estos hacen parte los sólidos suspendidos y los sólidos disueltos.

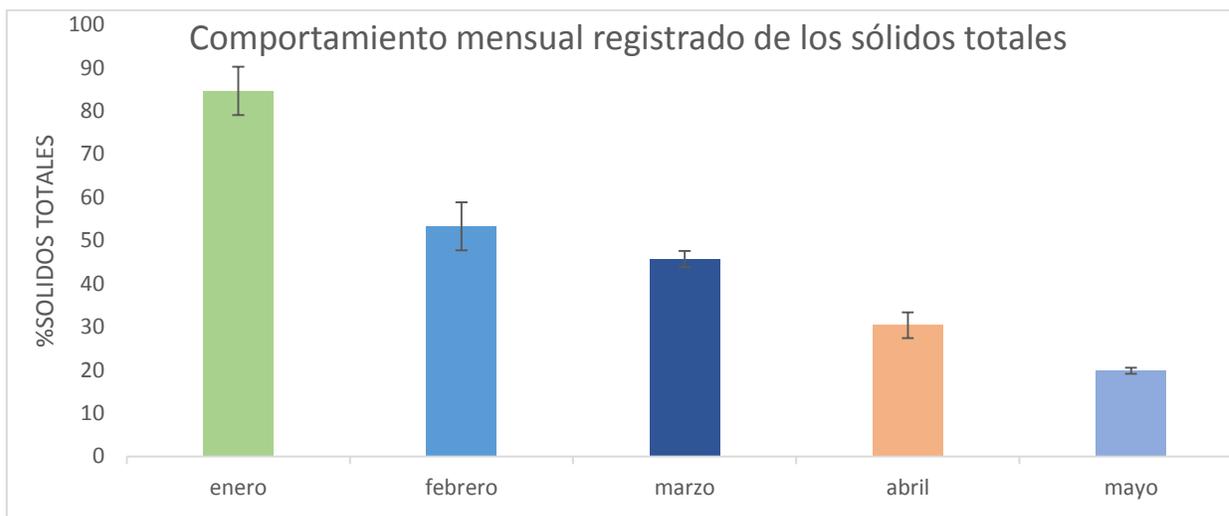
Tabla 8 Resultados de sólidos totales en los lodos como materia sólida

Mes	Muestreo Triplicado	Promedio mensual	Desviación estándar
Enero	1	84,67	5,59
	2		
	3		
Febrero	1	53,32	4,58
	2		
	3		
Marzo	1	45,70	3,87
	2		
	3		
Abril	1	30,40	2,74
	2		
	3		

Mayo	1	19,82	2.70
	2		
	3		

Fuente: propia

Gráfica 3 Comportamiento mensual registrado de los sólidos totales



Fuente: propia

Los datos obtenidos en la tabla N° 8. Muestran un cambio importante en el porcentaje de sólidos totales, respecto de cada mes. En este caso los valores son dependientes de la humedad. Tabla N° 7

La determinación de los sólidos totales permite estimar la suma de los sólidos suspendidos totales, sales disueltas y materia orgánica. Pero el resultado está condicionado por la temperatura y la duración de la desecación.

8.1.4 Cenizas

En la determinación de cenizas el agua y sustancias volátiles son evaporadas, mientras que las sustancias orgánicas son incineradas en presencia del oxígeno del aire para producir dióxido de carbono y óxido de nitrógeno

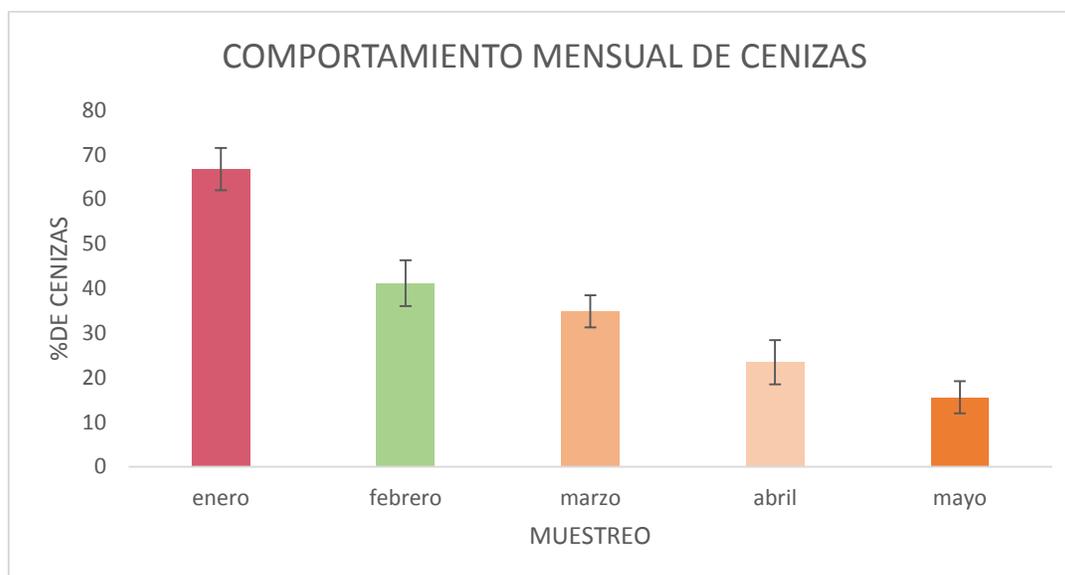
Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 9

Tabla 9 Resultados de cenizas en los lodos como materia sólida.

Mes	Muestreo Triplicado	Promedio Mensual	Desviación estándar
Enero	1	66,76	4,74
	2		
	3		
Febrero	1	41,16	5,12
	2		
	3		
Marzo	1	34,83	3,58
	2		
	3		
Abril	1	23,44	4,95
	2		
	3		
Mayo	1	15,56	3,62
	2		
	3		

Fuente: propia

Gráfica 4 Comportamiento mensual registrado para cenizas



Fuente: propia

El cálculo del porcentaje en cenizas en la incineración de un lodo es importante, pues permite determinar la cantidad de residuo sólido que finalmente puede quedar después de deshidratar completamente la muestra, en caso de utilizar la incineración como opción de manejo final de estos lodos. Debido al bajo contenido de material orgánico en la muestra, se observó que no disminuye considerablemente el volumen con la incineración.

8.2 Resultados para sólidos en los lodos como materia líquida

8.2.1 Sólidos totales

Tabla 10 Resultados de sólidos totales en los lodos como materia líquida

Mes	Muestreo	Promedio Mensual	Desviación Estándar	* Concentración Mg/l		
				Baja	Media	Alta
	1	320	0,67	350	700	1200
	2	360	0,83			
	3	375	0,72			

*Composición de aguas residuales domésticas (Tomado de: Metcalf y Eddy, 2003)

Los Sólidos totales (ST) están Compuestos de materia flotante, materia sedimentable, material coloidal y materia en solución.

8.2.2 Sólidos suspendidos totales

Tabla 11 Resultados de sólidos suspendidos totales en los lodos como materia líquida.

Mes	Muestreo	Promedio Mensual	Desviación Estándar	* Concentración Mg/l		
				Baja	Media	Alta
	1	115	0,76	100	200	350
	2	180	1,05			
	3	157	0,97			

** Resolución 0631 del 2015 *(Tomado de: Metcalf y Eddy, 2003)

Los sólidos suspendidos totales son un importante indicador ambiental puesto que su presencia disminuye el paso de la luz a través de agua evitando su actividad fotosintética en las corrientes, importante para la producción de oxígeno.

8.2.3 Sólidos suspendidos volátiles

Tabla 12 Resultados de sólidos suspendidos volátiles en los lodos como materia líquida.

Mes	Muestreo	Promedio Mensual	Desviación Estándar	* Concentración Mg/l		
				Baja	Media	Alta
	1	63,6	0,70	70	150	275
	2	47,8	0,56			
	3	51,7	0,40			

*(Tomado de: Metcalf y Eddy, 2003)

Los sólidos volátiles son, básicamente, la fracción orgánica de los sólidos o porción de los sólidos que se volatilizan a temperaturas de 550 - 550°C.

La concentración de sólidos volátiles se suele considerar como una medida aproximada del contenido de materia orgánica. Además, se usan para evaluar la estabilidad del lodo. Según se observa en la tabla 12, la materia orgánica en los lodos como materia líquida es baja.

8.3 Demanda Química de Oxígeno

La Demanda Química de Oxígeno (DQO), permite medir en un residuo la cantidad total de oxígeno que se requiere para la oxidación de materia orgánica, a dióxido de carbono y agua.

Se llevó a cabo siguiendo el método de reflujo cerrado/colorimetría, de acuerdo con el procedimiento establecido en el Standard Methods 5220D.

Se usa para medir el oxígeno equivalente a la materia orgánica oxidable químicamente mediante un agente químico oxidante fuerte, por lo general dicromato de potasio, en un medio ácido y alta temperatura. Para la oxidación de ciertos compuestos orgánicos resistentes se requiere la ayuda de un catalizador como el sulfato de plata.

La semireacción principal puede presentarse de la manera siguiente:



El ensayo de determinación de DQO al dicromato se lleva a cabo calentando en condiciones de reflujo total una muestra de volumen determinado con un exceso conocido de dicromato potásico ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) en presencia de ácido sulfúrico (H_2SO_4), durante un periodo de dos horas. La materia orgánica en la muestra se oxida, como

resultado se consume el dicromato de color amarillo que se reemplaza por el ión crómico color verdoso. Como catalizador se añade sulfato de plata (Ag_2SO_4).⁷²

Tabla 13 Resultados de Demanda Química de Oxígeno – DQO en los lodos.

Mes	Resultados promedio mgO_2/l	Desviación Estándar	*Valores máximos permitidos mgO_2/l	**Concentración mgO_2/l		
				Baja	Moderada	Alta
Enero	40,08	0,76	150,00	250	220	1000
Febrero	101,5	0,88				
Marzo	119	0,73				
Abril	197	0,97				
Mayo	267	1,20				
Mayo Líquido	192	1,08				

* Resolución 0631 del 2015 capítulo VII. ** (Tomado de: Metcalf y Eddy, 2003)

Según los datos obtenidos en la N° 13 con respecto a los niveles de DQO, comparando los resultados de cada mes se muestra un incremento en los valores de medida, asociado posiblemente a los diferentes factores climáticos que se presentaron en los meses de muestreo. Debido a que en los meses de enero, febrero, y marzo predominó el tiempo seco mientras que los meses de abril y mayo se caracterizaron por presentar una fuerte temporada de lluvias, estas lluvias arrastran material aumentando la concentración de la materia orgánica.

De acuerdo a los parámetros estipulados por La Resolución 0631 del 2015, la cual en el capítulo VII establece los valores límites máximos permisibles con vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales. Los valores de los meses de abril y mayo están por encima de los límites permisibles

⁷² Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD [online] Lección 8. Determinación y cálculo de la DBO5 y DQO EN: Internet: http://datateca.unad.edu.co/contenidos/358041/EXE/leccin_8_determinacin_y_clculo_de_la_dbo5_y_dqo.html - [cited 22 de abril 2016]

8.4 Demanda bioquímica de Oxígeno

Tabla 14 Resultados para Demanda bioquímica de Oxígeno – DBO de en los lodos.

Mes	Resultados mgO ₂ /l	*Valores máximos permitidos mgO ₂ /l	**Concentración mgO ₂ /l		
			Baja	Moderada	Alta
Enero	20	50,00	110	160	400
Febrero	35				
Marzo	58				
Abril	60				
Mayo	80				
Mayo Liquidado	86				

* Resolución 0631 del 2015, ** (Tomado de: Metcalf y Eddy, 2003)

La Demanda Bioquímica de Oxígeno es el método tradicional que mide la cantidad de oxígeno que consumen los microorganismos al proliferar en el agua residual y alimentarse de su materia orgánica.

Ecológicamente, al descargar aguas con alta materia orgánica esta es degradada por los microorganismos y ocasiona que se consuma mayor oxígeno, matando a la fauna acuática; desde un punto de vista sanitario, la materia orgánica sirve para que proliferen los organismos patógenos que ya suele contener el agua, de manera que cuanto más contaminada, mayor el tiempo y el peligro que representa como foco de infección

8.5 Coliformes totales

Tabla 15 Resultados para Coliformes totales en los lodos

Mes	Concentración	*Concentración UFC / 100ml		
		Baja	Moderada	Alta
Enero	11.000	1 x 10 ⁶	1 x 10 ⁸	1 x 10 ⁹
Febrero	1.500			
Marzo	2.000			
Abril	2.000			
Mayo	210			
Mayo liquidado	1.600			

* (Tomado de: Metcalf y Eddy, 2003)

8.6 Coliformes fecales

Tabla 16 Resultados para Coliformes fecales en los lodos.

Mes	Concentración UFC / g	*Niveles permitido UFC / g	
		A	B
Enero	11.000	<1,00 E (3)	< 2,00 E (+6)
febrero	210		
Marzo	210		
Abril	210		
Mayo	210		
Mayo liquido	1.100		

*Decreto número 1287 de 2014

Los análisis microbiológicos de coliformes totales y coliformes fecales. Muestran que los resultados están dentro de lo establecido por la norma. Se recomienda algún tipo de tratamiento para estos residuos con el objetivo de inactivar los organismos patógenos, y hacer que su disposición sea segura. Esto se puede lograr estabilizándolos con cal.

8.7 Caracterización de los niveles de metales pesados

De acuerdo con el decreto número 1287 de 2014 la caracterización de los residuos se debe realizar de acuerdo a análisis químicos de metales y variables microbiológicas, lo cual permite determinar la clasificación de estos residuos.

Teniendo en cuenta lo anterior se realizó la caracterización de los niveles de metales pesados en los lodos, dirigidos a determinar la peligrosidad de estos residuos. Esta caracterización se realizó en los laboratorios de control de calidad de la universidad de Pamplona, universidad industrial de Santander y laboratorio SIAMA LTDA. Ver resultados en anexos.

La tabla 17 muestra los resultados de la caracterización de metales; cobre, manganeso, plomo, fosforo, hierro, potasio, níquel, cromo, zinc. Realizada en la Universidad de Pamplona a partir del procedimiento 7.5. A excepción de aluminio

Tabla 17 Resultados obtenidos de la determinación metales

Niveles de metales encontrados en los lodos (mg/Kg)						
Parámetro	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Mayo lodo liquido
*Cobre	24,9	0,18	0,05	nd	nd	Nd
*Manganeso	24,6	13,8	24,5	23,7	22,7	1,01
*Plomo	0,54	0,47	0,54	0,86	0,68	0,50
*Fosforo	3,98	4,81	5,25	6,08	20,4	Nd
*Hierro	4,8285	15,6865	5,145	0,5885	0,244	0,2975
*Potasio	105,01	40,53	55,0355	39,013	40,891	36,7245
*Zinc	2,51	3,55	3,10	0,43	0,30	Nd
*Cromo	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd
*Níquel	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd
**Aluminio	x	X	X	x	69.764	x

Nd: Valores por debajo del límite de cuantificación detectado X: no realizado * Universidad de Pamplona. ** Laboratorio SIAMA.

Respecto a la caracterización de metales reportados en la tabla N° 17 se observa que las concentraciones de metales en las muestras, monitoreados mes a mes durante el estudio, cambian un poco. Si bien, los resultados obtenidos no conducen a una especiación química completa, si pueden tener un carácter informativo práctico, al mostrar el contenido de micronutrientes metálicos en las muestras analizadas.

La tabla 18 muestra datos típicos de niveles de algunos micronutrientes metálicos usados en la elaboración de abono orgánico.

Tabla 18 Micronutrientes comunes en materiales orgánicos usualmente utilizados

PARÁMETRO	GALLINAZA COMUN *	LOMBRICOMPOST			ABONO ORGÁNICO ****
		LOMBRINAZA**	PULPA DE CAFÉ^**	MATERIA ORGÁNICA BIODEGRADABLE***	
Cobre	32 ppm	—	3,1%	5%	----
Manganeso	196 ppm	—	45,8%	57%	—
Bromo					
fosforo	1.82%	23%	178 ppm 0,0178%	186 ppm 0,0186%	>1%
Hierro	283 ppm	—	13,5%	20%	—
Potasio	1,27 %	1,14%	40%	17%	mayor de 1%
Zinc	135 ppm	—	30,6%	6,9%	—

Fuente: *Castro, 1998;** ICA-PRONATA, ***García, 2006****NTC 5167

En referencia a los datos obtenidos de micronutrientes en los lodos reportados en la tabla 17, y realizando una comparación con algunos parámetros de referencia reportados en la tabla 18. Se evidencia la presencia de elementos micronutrientes, cuyo contenido es bajo en comparación con materiales como la gallinaza, lombricompost y abono orgánico. Por lo tanto, los micronutrientes disponibles en las muestras analizadas, no representan un aporte nutricional favorable en caso de disponerse como acondicionadores de suelo.

Además, el uso de estos desechos en cultivos agrícolas, solamente puede hacerse con un estricto control de calidad y certificación del ICA, para eliminar riesgos a la salud pública por persistencia de microorganismos patógenos o compuestos tóxicos que puedan generar impactos negativos sobre la salud de la comunidad.

La Tabla N° 19. Muestra los resultados de los análisis de laboratorio para metales obtenidos de las muestras de lodos de la PTAP del municipio de Santa Rosa del sur-Bolívar, correspondientes al mes de junio. Realizados en los laboratorios de la Universidad Industrial de Santander UIS.

Tabla 19 resultados obtenidos de metales en las muestras de lodos analizadas para el mes de junio

Niveles de metales encontrados en los lodos (mg/Kg)	
Parámetro	Resultado Junio
Arsénico (mg As/Kg)	10,78
Mercurio (mg Hg/Kg)	0,93
Selenio (mg Se/Kg)	0,69
Cadmio (mg Cd/Kg)	1,81
Aluminio (mg Al/Kg)	89.137
Molibdeno (mg Mo/Kg)	<10
Cromo (mg Cr/Kg)	10,88
Zinc (mg Zn/Kg)	142,72
Cobre (mg Cu/Kg)	139,49
Plomo (mg Pb/Kg)	116,09
Níquel (mg Ni/Kg)	3,17

Fuente: propia

La tabla 20 muestra los resultados obtenidos de la caracterización de los niveles de metales pesados para las muestras solidas de lodos del mes de mayo y junio. Igualmente muestran una comparación de estos con los valores permitidos según el decreto 1287/2014.

Tabla 20 Niveles de metales pesados encontrados en los lodos como materia sólida y concentración máxima permitida según el decreto 1287/2014.

Niveles de metales encontrados en los lodos (mg/Kg)				
Parámetro	Resultado Mayo	Resultado Junio	Decreto 1287 del 2014	
			Categoría A	Categoría B
Arsénico(As)	10,806	10,78	20	40
Cadmio (Cd)	1,39	1,81	8.0	40
Cobre (Cu)	Nd	139,49	1.000	1.750
Cromo (Cr)	Nd	10,88	1.000	1.500
Mercurio(Hg)	0,548	0,93	10	20
Molibdeno	x	<10	18	75
Níquel (Ni)	Nd	3,17	80	420
Plomo (Pb)	0,68	116,09	300	400
Selenio (Se)	0,599	0,69	36	100
Zinc (Zn)	0,30	142,72	2.000	2.800

Nd: Valores por debajo del límite de cuantificación detectado X: no realizado

A continuación en la tabla 21 se realiza una comparación de los resultados obtenidos, con la norma EPA, código CFR 40 parte 503 para biosólidos y el decreto 1287/2014.

Tabla 21 Comparación de criterios para el uso de biosólidos según la EPA. Código CFR 40 parte 503 para Biosólidos y el decreto 1287

Niveles de metales encontrados en los lodos (mg/Kg)										
Parámetro	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	EPA. Código CFR 40 parte 503		Decreto 1287 del 2014	
							Categoría A	Categoría B	Categoría A	Categoría B
Arsénico (As)	x	x	x	X	10,806	10,78	41	75	20	40
Cadmio (Cd)	x	x	x	X	1,39	1,81	39	85	8,0	40
Cobre (Cu)	24,9	0,18	0,05	Nd	Nd	139,49	1.500	4.500	1.000	1.750
Cromo (Cr)	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd	10,88	1.200	3.000	1.000	1.500
Mercurio (Hg)	x	x	x	X	0,548	0,93	17	57	10	20
Molibdeno	x	x	x	X	x	<10	No Regulado	No Regulado	18	75
Níquel (Ni)	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd	3,17	30	420	80	420

Plomo (Pb)	0,54	0,47	0,54	0,86	0,68	116,09	300	840	300	400
Selenio (Se)	x	x	x	X	0,599	0,69	36	100	36	100
Zinc (Zn)	2,51	3,55	3,10	0,43	0,30	142,72	7.500	2.800	2.000	2.800
Coliformes Fecales	11.000	210	210	210	210	X	< 1,00 E(+3)	< 2,00 E(+6)	< 1,00 E(+3)	< 2,00 E(+6)
Coliformes totales	11.000	1.500	2.000	2.000	210	X	No Regulado	No Regulado	No Regulado	No Regulado
<i>Salmonella sp</i>	x	x	x	X	x	X	<3/ 4g de muestra	< 2,00 E(+6)	Ausente	< 1,00 E(+3)
Huevos de Helminto	x	x	x	X	x	X	<3/ 4g de muestra	< 2,00 E(+6)	<1	<10
Virus entéricos	x	x	x	X	x	X	Clase < 1/4	---	<1	--

Nd: Valores por debajo del límite de cuantificación detectado X: no realizado

9. CLASIFICACIÓN DE ESTOS LODOS RESPECTO A SUS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS

De acuerdo a los resultados mostrados en las tablas 19, 20, y 21. Respecto a los resultados obtenidos de los niveles de metales pesados en las muestras de lodos analizadas, establecidos en el decreto 1287/2014 expedido por el ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial y la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA).

Estos se encuentran por debajo de los límites máximos permisibles. Por lo tanto, se considera que los niveles de los metales pesados medidos en los lodos no están presentes en concentraciones que signifiquen que estos residuos puedan catalogarse como peligrosos.

Sin embargo, observaciones de campo a largo plazo (varias décadas) a menudo muestran que los metales en los lodos pueden seguir siendo lo suficientemente disponibles, causando impacto negativo sobre el medio ambiente y la salud humana.⁷³

Desde el punto de vista de la planta de tratamiento, las altas concentraciones de aluminio residual, reportadas en la tabla 17 y 19. Correspondientes a muestras de

⁷³Brown, S.L., Henry, C.L., Chaney, R. et al. Using municipal biosolids in combination with other residuals to restore metal-contaminated mining áreas, En: Plant and Soil, 2003 p,249: 203.

los meses mayo y junio, Indican el uso ineficiente de la dosis óptima del coagulante, o problemas en la química de proceso de tratamiento.

Por lo tanto, las mediciones altas de aluminio pueden proporcionar al operador del acueducto información valiosa sobre diversos aspectos de rendimiento de la planta.

El valor elevado en la concentración de aluminio se debe posiblemente a que el dosificador del policloruro de aluminio (PAC) utilizado en la PTAP, para la época del estudio realizado, no estaba funcionando. Como consecuencia de esto, el proceso era llevado a cabo de forma manual, generando posibles errores humanos de dosificación en el proceso de coagulación.

Evaluando los datos obtenidos en la caracterización fisicoquímica de los lodos y haciendo una comparación con las normas de referencia; se realiza el siguiente análisis.

En relación al pH, los residuos analizados no presentan características corrosivas.

En lo que respecta al contenido de humedad del lodo como materia sólida, se observa que los lodos poseen una buena capacidad de deshidratación. Condicionada por los factores climáticos presentes.

En referencia a los resultados obtenidos de los niveles de metales pesados en las muestras de lodos analizadas, establecidos en el decreto 1287/2014 expedido por el ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial. Estos se encuentran por debajo de los límites máximos permisibles. Por lo tanto, se considera que los niveles de los metales pesados medidos en los lodos no están presentes en concentraciones que signifiquen que estos residuos puedan catalogarse como peligrosos.

En cuanto a los niveles de aluminio encontrados en las muestras analizadas; se ha demostrado que el uso extensivo de los lodos ricos en aluminio en la agricultura puede contaminar el suelo y las vías fluviales cercanas. La forma en la que el aluminio está presente en la solución es crucial para su impacto sobre el medio ambiente. En los seres humanos altas concentraciones de aluminio generan problemas neurotóxicos, entre ellos el Alzheimer.

En referencia a los valores de la concentración de Micronutrientes caracterizados en este análisis tales como Hierro, Manganeso, Zinc, Cobre, selenio, fósforo, y potasio. Se evidencia que los lodos presentan cantidades pequeñas de elementos

nutrientes. Por lo tanto, no representan un aporte nutricional apreciable, en caso de disponerse como acondicionadores de suelos.

En la parte microbiológica, aun no se tienen datos de virus entéricos, Salmonella sp y huevos de helminto viables. Por lo que respecto a estos parámetros no es posible determinar si los lodos analizados son categoría A o B.

Respecto al tratamiento microbiológico la literatura reporta varias investigaciones realizadas. Como es el caso de la elaborada en la PTAR el Salitre de Bogotá, en la cual se evaluaron tratamientos térmico a 60 °C y 80 ° C y alcalino cal viva (CaO) en dosis de 25 %, 45 %, 65% y 85 % durante 43 días de contacto para la desinfección del lodo espesado y biosólidos deshidratado, evaluando la eliminación de indicadores de contaminación fecal coliformes fecales, fagos somáticos y huevos de helmintos. Los resultados mostraron que a 80 ° C durante 10 minutos los lodos tratados adquirieron características de biosólidos clase A y que una dosis de 25 % de cal viva es suficiente para eliminar los patógenos en 21 días de tratamiento. A pesar de que la EPA (2003) recomienda mantener el pH sobre 12 unidades por 72 horas, una temperatura mayor de 52°C por 12 horas y un secado por aire, el tratamiento alcalino evaluado permitió alcanzar un producto clase A sin cumplir los requisitos de temperatura valor máximo 42°C durante 4 horas y secado por aire.⁷⁴

Respecto a todo lo anterior, los lodos de la PTAP del municipio del Santa Rosa del sur se consideran como lodos no peligrosos. Pero debido a la permanencia de algunos metales y organismos patógenos y a sus posible magnificación con riesgos para la salud humana y medioambiental, se recomienda realizar una vigilancia por parte de los operarios de la planta a todos los procesos de utilización y disposición final para estos residuos.

⁷⁴ Araque Manrique, MARÍA DEL PILAR. EVALUACIÓN DE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS Y ALCALINO EN LA DESINFECCIÓN DEL LODO GENERADO PTRA EL SALITRE. Tesis Magister en ingeniería civil. Bogotá: Universidad de los andes. Departamento de ingeniería civil y ambiental, 2006.60p.

10. FORMA MÁS ADECUADA PARA LA DISPOSICIÓN FINAL DE LODOS

En general, se debe considerar la disposición final como la última opción dentro de una estrategia general de manejo de lodos. La disposición dependerá del tipo de lodo. Los sitios de disposición deberán contar con sistemas técnicos de operación y diseño sencillos, con mínimos requerimientos de operación, control, supervisión y mantenimiento.⁷⁵

Los sitios para disposición final de lodos deben ser cuidadosamente seleccionados, diseñados técnicamente, tomando en cuenta criterios geológicos satisfactorios, hidrología, uso actual y futuro del agua subterránea, geotecnia, estabilidad de pendientes, protección de la erosión, provisión de servicios, factores socioeconómicos.

Actualmente existen diferentes alternativas de manejo para dar un destino final seguro a los lodos resultantes de los procesos de tratamiento de aguas. Según la calidad y el volumen de los lodos obtenidos, es posible optar por tratamientos finales en base a incineración, aplicación al terreno, disposición en rellenos y disposición en rellenos sanitarios de residuos sólidos urbanos. La aplicación de las alternativas tecnológicas disponibles para el tratamiento o destino final de los lodos debe ser acorde con los niveles de desarrollo y recursos disponibles en los diferentes países donde se aplique. A nivel mundial, durante varios años, el uso benéfico mediante la aplicación al terreno ha sido el método preferido para la disposición del lodo generado en plantas de tratamiento de aguas residuales urbanas. Esto debido a los nutrientes que poseen los lodos, que lo hace una excelente enmienda de suelo y por consiguiente, su uso como fertilizante en la agricultura ha sido ampliamente difundido. Sin embargo, en el último tiempo, se ha generado una inquietud creciente acerca de los impactos a la salud que se asocian a la utilización de este método de tratamiento, lo que ha hecho que la co- disposición de lodos con residuos sólidos urbanos en rellenos sanitarios, se presente como una adecuada alternativa para la disposición de lodos.⁷⁶

Teniendo presente los resultados obtenidos para los análisis realizados de caracterización de los niveles de metales pesados y revisando información bibliográfica de cada una de las alternativas de uso reportadas por los diversos trabajos de investigación respecto al tema.

⁷⁵ MANEJO AMBIENTALMENTE ADECUADO DE LODOS PROVENIENTES DE PLANTAS DE TRATAMIENTO. [online]. [cited 25 de agosto de 2016]. -internet<<http://www.bvsde.ops-oms.org/eswww/repamar/gtzproye/lodos/lodos.html>>

⁷⁶ BUILES BLANDON, Sebastián. TRATAMIENTO Y ADECUADA DISPOSICION DE LODOS DOMESTICOS E INDUSTRIALES. Trabajo de monografía para optar el título de Tecnólogo Químico, Pereira: UNIVERSIDAD TECNOLOGICA DE PEREIRA. Facultad de tecnologías. Tecnología química, 2010.103p.

Se presentan entonces dos posibles opciones de la forma más adecuada para la disposición final de los lodos, tales como:

10.1 Fabricación de ladrillos

Para la industria de la construcción, los lodos muestran una gran aplicabilidad, siendo una fuente de producción constante y confiable, debido a que cumplen las características necesarias para generar una composición mínima aceptable tanto en la elaboración de cemento como la de ladrillo.

La caracterización de los LTAP se usa para determinar los componentes que pueden afectar el proceso de fabricación de los ladrillos, entre los que se encuentra el contenido de materia orgánica y agua. A partir de entonces, el lodo se adiciona al ladrillo en diferentes niveles para determinar el porcentaje óptimo de incorporación. Se ha informado un éxito de 100% en ensayos con ladrillos hechos a partir de lodos de abastecimiento de agua en una porción de 80:20. El uso de LTAP en la fabricación de ladrillos muestra grandes ventajas en el ahorro de materia prima y en el mejoramiento de las propiedades del mismo. Este hecho muestra que una gran alternativa para el uso de los lodos es en la fabricación de ladrillo.⁷⁷

Ventajas de la producción de ladrillos: Eliminación de metales pesados por el proceso de cocción. Eliminación de la emisión de olores. Sirven para reforzar la estructura mecánica del ladrillo al quedarse incorporada en este. Incorporación de materia orgánica, ya que ésta al degradarse y combustionarse durante la cocción, crea una porosidad interna en el ladrillo propiciada por la formación y salida de los gases de descomposición. Desventajas: Emisión de olores al secar los ladrillos. Emisión de gases durante la cocción, ya sean gases inorgánicos u orgánicos volátiles.⁷⁸

⁷⁷ BABATUNDE, A.O. ZHAO, Y.Q. Constructive approaches towards water treatment works sludge management : an international review of beneficial re-uses.En: Critical Reviews in Environmental Science and Technology, V. 2, p129-164

⁷⁸ GALVIS TORO, juliana. RIVERA GUERRERO, XIMENA. caracterización fisicoquímica y microbiológica de los lodos presentes en la planta de tratamiento de aguas residuales industriales (PTARI) de la empresa jugos hit de la ciudad de Pereira. 2013. op,cit.

10.2 Disposición en un relleno sanitario

El primer factor a considerar para este método de disposición, es el traslado de los lodos de la planta a las instalaciones del relleno sanitario. Para poder transportarse en camiones el lodo debe tener una consistencia semisólida. Es decir, se debe dejar secar el lodo antes de colocarlo en el relleno.

En un relleno específico para lodos de la planta potabilizadora, los dos principales métodos de disposición en rellenos sanitarios son rellenos por trincheras o por área. El relleno por trincheras se puede subdividir en trincheras angostas o anchas. El relleno por área se divide en tres diferentes tipos: por montículos, por capas o por diques. El método seleccionado se determina por el contenido de sólidos del lodo, la estabilidad del lodo, la hidrogeología del sitio localización del manto freático y manto rocoso, pendiente del terreno y disponibilidad de terreno.⁷⁹

10.3 Relleno por trincheras

En los rellenos por trincheras, los lodos se acomodan completamente por debajo del nivel del suelo. La profundidad de las trincheras depende de la profundidad del manto freático y de la mano rocosa; se debe mantener una distancia mínima, con una capa de suelo que sirva de amortiguador, entre los lodos y el sustrato. La profundidad de las trincheras depende también de la estabilidad de las paredes de las trincheras y de las limitaciones de equipo. Las trincheras angostas, de menos de 3 m de ancho, se utilizan generalmente para lodos con bajas concentraciones de sólidos que no podrían soportar ningún tipo de manejo con equipo pesado, es decir, las trincheras angostas proveen un método económico para la disposición de lodos muy húmedos, sin embargo los requerimientos de terreno y la pobre utilización del mismo, así como la cantidad de espacio entre cada una de las trincheras, son las principales desventajas que presenta este método. Las trincheras anchas, hasta de 15 m de ancho, se usan para lodos con concentraciones de sólidos lo suficientemente altas como para soportar el manejo con equipo pesado. La principal ventaja de las trincheras anchas sobre las trincheras angostas es el mejor aprovechamiento del terreno, ya que se requiere un menor número de trincheras para manejar la misma cantidad de lodo. Una desventaja es que los lodos deben ser descargados directamente sobre el suelo de la trinchera, por lo que se requiere acceso para los camiones. La disposición en rellenos de trincheras tiene la ventaja que los camiones pueden descargar los lodos desde terreno firme, mientras

⁷⁹Comisión nacional del agua. Manual de agua potable y alcantarillado: Potabilización y tratamiento. Guía para el manejo, estabilización y disposición de lodos químicos. México. Noviembre de 2007

que una excavadora hidráulica que se encuentre dentro de la trinchera lo acomoda y compacta. Las trincheras son relativamente rápidas y fáciles de construir, lo que minimiza los costos de construcción. La planeación y diseño de un relleno de lodo por trincheras requiere que se determinen los siguientes parámetros para poder predecir el área requerida para un plan de disposición a largo plazo:

- Espesor de la cobertura
- Profundidad de la excavación
- Longitud
- Orientación
- Profundidad del relleno de lodo
- Espaciamiento
- Anchura

El espesor de la cobertura final depende del ancho de la trinchera y del tipo de equipo que se utilizará en las operaciones de cubierta. Se debe hacer notar que no se requiere una cobertura diaria para el control de olores cuando se está relleno con lodos de plantas potabilizadoras. Los factores que influyen para determinar la profundidad de la excavación incluyen: localización de las aguas subterráneas y manto rocoso, permeabilidad del suelo, capacidad de intercambio iónico del suelo, limitaciones de equipo y estabilidad de las paredes del relleno. La longitud de las trincheras está limitado por el contenido de sólidos del lodo y por la pendiente del terreno; se deben construir trincheras cortas o con diques para retener los lodos cuando tienen muy bajo contenido de sólidos. Para una utilización óptima del terreno, las trincheras deben estar orientadas paralelamente una de la otra. La estabilidad de las paredes del relleno, además de controlar la profundidad de las trincheras, ayuda a determinar el espaciamiento entre cada una de ellas.⁸⁰

10.4 Relleno por áreas

A diferencia del relleno por trincheras, donde el lodo se dispone debajo del nivel del suelo, en el relleno por área los lodos se disponen sobre el nivel del suelo. El relleno por área se puede llevar a cabo por tres formas diferentes:

- Montículos, donde los lodos se mezclan con tierra para que esté lo suficientemente estable como para formar montículos. Después de haber apilado el lodo en montículos de aproximadamente 1.80 m, se cubren con por lo menos 1 m de material de cobertura.
- Capas, donde los lodos se esparcen en capas de aproximadamente 15-30 cm sobre una gran superficie de terreno, lo que proporciona secado adicional de los

⁸⁰ Comisión nacional del agua. Manual de agua potable alcantarillado y saneamiento: Potabilización y tratamiento. IBIT., p.81

lodos y ayuda a obtener una concentración más alta de sólidos; este método es favorable para aquellos lodos que no se pueden desaguar fácilmente.

- Diques, donde se construyen paredes con tierra para formar diques de contención que puedan almacenar el lodo. Los diques se pueden rellenar utilizando el método de montículos o el de capas. Se deben construir caminos de acceso para que los camiones puedan descargar los lodos directamente en los diques. Aunque el contenido de sólidos no está limitado para los rellenos por área, el requerimiento es que el lodo sea capaz de soportar el manejo con equipo pesado debido a que no se tienen medios para contener lodos poco estables. Estas características se pueden adquirir mediante un buen desagado de los lodos.⁸¹

10.1 Consideraciones Ambientales

La contaminación del agua subterránea es una de las principales preocupaciones para la determinación del sitio adecuado para el relleno, es por eso que se requieren líneas bajo el relleno para llevar un control de los escurrimientos del relleno. Los controles de diseño pueden prevenir los impactos adversos ocasionados al ambiente por el lixiviado de sustancias contaminantes y por la generación de gas metano. Otras preocupaciones, como la generación de olores y polvos, se pueden controlar mediante estrategias de operación, más que de diseño. Se pueden minimizar la generación de lixiviados mediante un diseño adecuado de drenajes. La pendiente del relleno debe ser suficiente como para drenar adecuadamente el agua de lluvia y los escurrimientos de lluvia deben ser colectados y desviados alrededor del relleno mediante tuberías y diques. Se puede controlar la contaminación con lixiviados del agua, ya sea subterránea o superficial, mediante la implementación de las siguientes estrategias de diseño:

- Evaluar las condiciones hidrogeológicas y topográficas naturales y analizar las probabilidades de atenuar la contaminación
- Uso de suelos importados
- Uso de cubiertas
- Uso de sistemas de colección de lixiviados y sistemas de tratamiento La profundidad del manto freático y la conductividad hidráulica del suelo subterráneo son las principales características hidrogeológicas del sitio que afectan la retención de los lixiviados. En general, unas características favorables del suelo son: un alto contenido de arcilla, una alta capacidad de intercambio catiónico y un pH relativamente alto.⁸²

⁸¹ Comisión nacional del agua. Manual de agua potable alcantarillado y saneamiento: Potabilización y tratamiento. IBIT., p.81

⁸² IBIT., p.81

11. CONCLUSIONES

Evaluando los datos obtenidos en la caracterización fisicoquímica de los lodos recolectados, y haciendo una comparación con las normas de referencia se puede concluir lo siguiente:

Según la clasificación que se da a los lodos, teniendo como base el decreto número 1287 de 2014, por el cual se establecen criterios para el uso de los biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales, respecto al contenido de metales, se establece que los niveles de los metales pesados medidos en los lodos no están presentes en concentraciones que signifiquen que estos residuos puedan catalogarse como peligrosos.

En la parte microbiológica, aun no se tienen datos de virus entéricos, *Salmonella sp* y huevos de helminto viables. Por lo que respecto a estos parámetros no es posible determinar si es biosólidos categoría A o B.

En referencia a los valores de la concentración de micronutrientes caracterizados se evidencia que los lodos presentan cantidades mínimas de elementos nutrientes. Por lo tanto, no representan un aporte nutricional considerable, en caso de disponerse como acondicionadores de suelos.

Desde el punto de vista de la planta de tratamiento, las altas concentraciones de Al en los residuos indican, un posible mal manejo en una dosis óptima de coagulante, lo que hace que se incrementen los costos por la cantidad de insumos que se están utilizando, además de que se está sobre dosificando el agua, conllevando a producir elevadas concentraciones de aluminio residual en los lodos lo cual pueden generar implicaciones por contaminación medioambiental. Por lo tanto, es importante optimizar el proceso de coagulación con el fin de reducir al mínimo la presencia de residuos de aluminio en los lodos.

Además, respecto a los valores de la concentración de aluminio de los lodos de la PTAP estos no son aptos para ser utilizado como acondicionador de suelos agrícolas, pues se ha demostrado que el uso extensivo de los lodos ricos en aluminio en la agricultura puede contaminar el suelo y las vías fluviales cercanas, lo cual representa un riesgo para la salud humana y animal.

Considerando que los lechos de secado de la PTAP funcionan de manera correcta y que es posible obtener lodos con una buena capacidad de deshidratación. Lo cual

favorece su manejo y disposición final. Se sugirió dos posibles alternativas de disposición final; la elaboración de ladrillos y la disposición en el relleno sanitario municipal. Ya que estas se ajustan al requerimiento de herramientas básicas, y no se requiere de adquisición de terrenos, factor económico. Cabe resaltar que los sitios para disposición final de los lodos deben ser diseñados, siguiendo criterios técnicos, ambientales y económicos. Para evitar estos se conviertan en posibles fuentes de contaminación.

Se evidenció que los parámetros fisicoquímicos no siguen un comportamiento apreciable en relación con el cambio climático presente durante los meses de estudio.

12. RECOMENDACIONES

Se recomienda optimizar los procesos de coagulación con el fin de reducir al mínimo la presencia de residuos de aluminio en los lodos.

Igualmente es recomendable un nuevo análisis de aluminio a los lodos con el fin de verificar el contenido de aluminio en los lodos con la puesta en funcionamiento de dosificador.

Para que la disposición de lodos sea segura, Se recomienda la estabilización química con la utilización de cal, con el fin de inactivar los organismos patógenos.

Se recomienda realizar una vigilancia de todos los procesos de utilización y disposición final para estos residuos.

Adicionalmente, se recomienda acondicionar el relleno sanitario con el fin de realizar una disposición segura de estos desechos.

13. BIBLIOGRAFÍA

A.L.G. Gastaldini, et al. The use of water treatment plant sludge ash as a mineral addition. En: Construction and Building Materials 94 (2015) 513–520

Brown, S.L., Henry, C.L., Chaney, R. et al. Using municipal biosolids in combination with other residuals to restore metal-contaminated mining areas. En: Plant and Soil, 2003 p,249.

BABATUNDE, A.O.; ZHAO. Y.Q. Constructive approach towards water treatment works sludge management: An international review of beneficial re-uses, En: Critical Reviews in Environmental Science and Technology. 2007, vol.37, p129-164.

BUILES BLANDON, Sebastián. Tratamiento y adecuada disposición de lodos domésticos e industriales. Trabajo de monografía para optar el título de Tecnólogo Químico, Pereira: Universidad tecnológica de Pereira. Facultad de tecnologías. Tecnología química, 2010.103p.

CAÑAS ROJAS, Christian. Estudio de la aplicabilidad e implementación del policloruro de aluminio como coagulante primario en la planta la flora. Proyecto de grado ingeniero químico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías –físicoquímicas. Escuela de ingeniería Química. 2005. p 142

CARRILLO GÓMEZ, Jennifer Katherine. Determinación, evaluación, selección y formulación de la alternativa más viable para el manejo de los lodos generados en la planta de aguas residuales los colorados del municipio de los patios. Proyecto de grado ingeniero químico. Pamplona: Universidad de Pamplona. Facultad de ingenierías y arquitecturas. Programa de ingeniería química, 2014. 112p.

CASTRILLÓN, Daniela. GIRALDO, María de los ángeles. Determinación de las dosis óptimas del coagulante sulfato de aluminio granulado tipo b en función de la turbiedad y el color para la potabilización del agua en la planta de tratamiento de villa Santana. Proyecto de grado Tecnólogo Químico. Pereira: Universidad tecnológica de Pereira. Escuela de tecnología química, 2012, 85 p.

Colombia, Ministerio de la protección social. Decreto número 1575 16, Mayo ,2007. Por el cual se establece el Sistema para la Protección y Control de la Calidad del agua para consumo humano.

CERÓN, Oswaldo. MILLÁN, Sandra, *et al*, aplicación de lodos de plantas potabilizadoras para elaborar materiales de construcción. [Online]. [Cited 29 de marzo 2016]

Colombia, MINISTERIO DE LA PROTECCIÓN SOCIAL. Decreto número 1575 (16, Mayo ,2007). Por el cual se establece el Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano.

Comisión nacional del agua. Manual de agua potable y alcantarillado: Potabilización y tratamiento. Guía para el manejo, estabilización y disposición de lodos químicos. México. Noviembre de 2007

CD, Carrington. P.M, Bolger. Toxic Metals: Lead, En: Encyclopedia of Food Safety. 2014, vol.2, P. 349–351

D.R. Parker. ALUMINUM SPECIATION. En: Encyclopedia of Soils in the Environment 2005, P 50–56.

D. Caniani, S. Masi, I.M. Mancini, E. Trull. Innovative reuse of drinking water sludge in geo-environmental applications, En: Waste Management. Marzo, 2013.vol. 33, p 1461–1468

DAYTON, E.A. BASTA, N.T. Characterization of drinking water treatment residuals for use as a soil substitute. En: Wáter Environ. Res. 2001, vol.73 (1), p.52-57

DONADO H. Plan de gestión para lodos generados en las PTAR-D de los municipios de Cumaral y san Martín de los llanos en el departamento del Meta. Candidato a magister en gestión ambiental. Bogotá. PONTIFICIA.UNIVERSIDAD JAVERIANA. FACULTAD DE ESTUDIOS AMBIENTALES Y RURALES. 2013.86p

DA SILVAA, Elodie, *et al*. Toxicity of mercury to the earthworm *Pontoscolex corethrurus* in a tropical soil of French Guiana.En: Applied Soil Ecology.2016.vol.104, p. 79–84

GARCÉS ARANCIBIA, Fernando, DÍAZ AGUIRRE Juan Carlos. Acondicionamiento de lodos producidos en el tratamiento de agua potable. [Online]. [Cited 23 de abril 2016]-internet <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/caliagua/mexico/02263e09.pdf>

GARCÍA CEBALLOS, Cristian David. Tratamiento de efluentes para la planta de potabilización de agua los cuervos en el municipio de Chinchiná. Tesis. Maestría en

Ingeniería ambiental. Manizales. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de ingeniería y arquitectura. 2014.144p

GALVIS TORO, Juliana. RIVERA GUERRERO, XIMENA. Caracterización fisicoquímica y microbiológica de los lodos presentes en la planta de tratamiento de aguas residuales industriales (PTARI) de la empresa jugos hit de la ciudad de Pereira. Trabajo de grado. Tecnólogo en Química. PEREIRA: Universidad tecnológica de Pereira. Facultad de tecnologías. Escuela de química. 2013.101p

GABINO, Herbert. RAMIREZ Manrique, MARIA. ROA RAMIREZ Sandy. Evaluación técnica y operativa del proceso de tratamiento de agua potable en la empresa de acueducto del municipio Yopal, Casanare. Proyecto de grado. INGENIERIA INDUSTRIAL. Yopal: Universidad Nacional Abierta Y A Distancia Unad. Escuelas de ciencias básicas.

GÓMEZ, Álvaro Julián Alberto. Evaluación de las condiciones de dosificación de cloro en la planta de tratamiento del acueducto Cestillal. Trabajo de grado tecnólogo químico. Pereira: Universidad tecnológica de Pereira. Facultad de tecnología. Departamento de química, 2008. 99p

GOLDBOLD, P. LEWIN, K.GRAHAM, A.BARKER, P. The potential reuse of water utility products as secondary commercial materials. En: WRc technical report series. No 6081, project contract no. 12420-0. 2003.

GUY, Berthon. Chemical speciation studies in relation to aluminium metabolism and toxicity. En: Coordination Chemistry Reviews. 1996. Vol.14, P. 241-280

H. El-Didamony a, Kh.A. Khalil a, Mohamed Heikal. Physico-chemical and surface characteristics of some granulated slag-fired drinking water sludge composite cement pastes, En: HBRC Journal. Julio, 2014.vol 10,p 73-81

Hamid Iqbal, et al. Physico-Chemical Analysis of Drinking Water in District Kohat, Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan.En: International Journal of Basic Medical Sciences and Pharmacy (IJBMS). December. 2013, Vol. 3, No. 2, p. 2049-4963

HUANG A, Chung-Ho, WANG, Shun-Yuan. Application of water treatment sludge in the manufacturing of lightweight aggregate. En: Construction and Building Materials. 2013. vol. 43, p. 174-183

JOYA PRADA, Adriana. Estudio del uso de los lodos generados en sistemas de tratamiento de agua potable y residual. Tesis: Especialista en Química.

Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ciencias. Escuela de Química. 2014.95p

JONAS, Tallkvist. OSKARSSON, Agneta. Handbook on the Toxicology of Metals, En: Toxicology of Metals. 2015. vol.2, no.4, P. 1077–1089

KEMMER, Frank N; McCallion, John. Manual Del agua, tratamiento y aplicaciones. 1 ed. México. Nalco Chemical Company. Mc Graw Hill, 1989. Pág: 8-2

LU LIN, et al. Sorption of metals and metalloids from reverse osmosis concentrate on drinking water treatment solids. En: Separation and Purification Technology. (2014).v.134, P 37–45

LUCCHINI, Roberto G. ASCHNER, Michael. KIM, Yangho. Handbook on the Toxicology of Metals, En: Toxicology of Metals. 2015. Vol.2, no.4, P. 975–1011

MARTÍNEZ CÓRDOVA, Marco Vinicio. Estudio para el tratamiento, manejo y disposición final de lodos generados en plantas de tratamiento de agua potable. Proyecto de grado. Ingeniero ambiental Quito, Julio 2012.186P

MANZANO, Gutiérrez Rebeca. Selección de plantas y enmiendas para la recuperación de suelos de mina contaminados con arsénico y metales pesados. Tesis doctorado, Madrid. Universidad Autónoma de Madrid. Departamento de Química Agrícola, 2012.p363.

MARCOS, von Sperling. Introducción a la calidad del agua y al tratamiento de aguas residuales. Traducido por Iván Andrés Sánchez Ortiz. 1 edición en español. Universidad de Nariño Colombia. Editorial universitaria, 2012, 127p.

Méndez, Judith Prieto, González Ramírez, César A. Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. En: Tropical and Subtropical Agroecosystems, 2009. v.10, p 29 – 44

M. Fontecave, J.L. Pierre. Iron: Metabolism, toxicity and therapy, En: Biochimie. Volume 75, Issue 9, 1993, P 767-773

Ministerio de Desarrollo Económico. Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico. Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS – 2000. Sección II, Título C, sistemas de potabilización.

MOUNA Cherifi, BOUTEMINE Nabila. Debra F. Laefer. Effect of sludge pH and treatment time on the electrokinetic removal of aluminum from water potabilization treatment sludge, En: C. R. Chimie. (2016), P.1- 6

MORENO JIMÉNEZ, Eduardo. Recuperación de suelos mineros contaminados con arsénico mediante Fito tecnología. Tesis doctoral. Departamento de Química Agrícola, Universidad autónoma de Madrid, Madrid. 2010.204P

MURILLO, Diana Marcela. Análisis de la influencia de dos materias primas coagulantes en el aluminio residual del agua tratada. Trabajo de grado Tecnólogo Químico. Pereira: universidad tecnológica de Pereira. Escuela de tecnología química, 2011. 128p

ORTIZ PINEDA, Carolina. Prevalencia de huevos de helmintos en lodos, agua residual cruda y tratada, provenientes de un sistema de tratamiento de aguas residuales del municipio el rosal, Cundinamarca. Trabajo de grado. Magister en Ciencias Microbiología. Universidad nacional de Colombia. Facultad de ciencias BOGOTÁ, D.C., 2010.351p

Pan, J.R.; Huang, C.; Lin, S. Reuse of fresh water sludge in cement making. Wat. Sci. & Tech. 2004, v 50, 183-188.

PALENCIA SALGAR, Adriana Roció. Diseño de una planta de purificación de agua para consumo humano en la vereda de Acapulco, municipio san juan de Girón – SANTANDER. Proyecto de grado: Ingeniera Química. Universidad industrial de Santander. Bucaramanga.2014, 106p

RAMIREZ FERNÁNDEZ, Guillermo Andrés. Manejo de lodos producidos en la planta de tratamiento de agua potable, planta ii, del municipio de Cartago, Valle. Proyecto de grado. Ingeniería química. Manizales, Colombia: universidad nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería y Arquitectura. 2003.106p

RAMOS ORTEGA, Lina María. et al. ANÁLISIS DE LA CONTAMINACIÓN MICROBIOLÓGICA (COLIFORMES TOTALES Y FECALIS) EN LA BAHÍA DE SANTA MARTA, CARIBE COLOMBIANO. EN: Acta biol. Colomb., 2008 Vol. 13 No. 3, p 87 – 98.

RAIGOSA RESTREPO, Mario Alonso. Evaluación de alternativas para el manejo de lodos provenientes de las plantas de potabilización de agua de los municipios del departamento de Risaralda mediante el análisis costo-beneficio, 2012. P.113

Ramírez Aristizábal, Luz Stella. Manual de Microbiología. Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Tecnologías, Escuela de Química.

SATTI, Patricia. Métodos de análisis de lodos tratamiento, disposición y usos. [Online]. [Cited 23 de mayo 2016]-
http://www.cofes.org.ar/descargas/relas/4_jornada/1_Curso_Metodos_Dra_Patricia_Satti_COFES-1.pdf

SANDOVAL YOVAL, Luciano, et al. Tratabilidad de los lodos producidos en la potabilización del agua.[online].[cited 23 de abril 2016]-internet <
<http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/tratagua/peru/mexapa045.pdf>>

SANTOS, Silvia. UNGUREANU, Gabriela. BOAVENTURA, Rui. BOTELHO, Cidália. Selenium contaminated waters: An overview of analytical methods, treatment options and recent advances in sorption methods. En: Science of the Total Environment, 2015. p 521–522.

SUILING Wang, XIANGYU Zhao. On the potential of biological treatment for arsenic contaminated soils and groundwater, En: Journal of Environmental Management. (2009) vol. 90, p2367–2376

TORRES, Patricia. HERNÁNDEZ, Darwin. PAREDES, Diego. Uso productivo de lodos de plantas de tratamiento de agua potable en la fabricación de ladrillos cerámicos, En: Revista ingeniería de construcción. 2012. vol.27 no.3, p. 145 – 154.

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD [online] Lección 12. Transferencia de iones EN: Internet:
http://datateca.unad.edu.co/contenidos/358040/Contenido_en_linea_Disenio_de_Plantas_Potabilizadoras/leccin_12_transferencia_de_iones.html -[cited 22 de abril 2016

VAN BENSCHOTEN, John E. EDZWALD, James K. Measuring Aluminum During Water Treatment: Methodology and Application, En: American Water Works Association. MAY, 1990. Vol. 82, No. 5 p. 71-78

X.H. Zhao, Y.Q. Zhao, and P. Kearney: Transformation of beneficially reused aluminum sludge to potential P and Al resource after employing as P-trapping material for wastewater treatment in constructed wetland, En: Chemical Engineering Journal, v174, 2011. p 206–212

ZHANG, Fu-Shen, YAMASAKI, S, NANZYU, M. Waste ashes for use in agricultural production: I. Liming effect, contents of plant nutrients and chemical characteristics of some metals, En: Science of The Total Environment.2002.vol.284,p. 215–225

ZHONG Lian Yang; BAO Yu Gao; QIN Yan Yue; YAN Wang. Effect of pH on the coagulation performance of Al-based coagulants and residual aluminum speciation during the treatment of humic acid–kaolin synthetic water, En: Journal of Environmental Sciences. Febrero, 2010. vol.178, p. 596–603