



# UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO

## FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

### ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA



**“TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS Y GASES DE LOS  
RESIDUOS SÓLIDOS DEL BOTADERO DE LA CIUDAD DE  
JULIACA MEDIANTE EL PROCESO DE ADITIVOS  
TENSIOACTIVOS”**

**TESIS**

**PRESENTADA POR:**

**Bach. SERGIO TICONA VELARDE**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO QUÍMICO**

**PUNO – PERÚ**

**2024**



NOMBRE DEL TRABAJO

**TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS Y GASES  
DE LOS RESIDUOS SOLIDOS DEL BOTAD  
ERO DE LA CIUDAD DE JULIACA MEDIA**

AUTOR

**SERGIO TICONA VELARDE**

RECUENTO DE PALABRAS

**18343 Words**

RECUENTO DE CARACTERES

**100894 Characters**

RECUENTO DE PÁGINAS

**113 Pages**

TAMAÑO DEL ARCHIVO

**2.9MB**

FECHA DE ENTREGA

**Jan 10, 2024 6:33 AM GMT-5**

FECHA DEL INFORME

**Jan 10, 2024 6:34 AM GMT-5**

● **20% de similitud general**

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos

- 19% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 9% Base de datos de trabajos entregados
- 2% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● **Excluir del Reporte de Similitud**

- Material bibliográfico
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 12 palabras)



*Lidia Ensueño Romero*  
Dra. Lidia Ensueño Romero Irujo  
DIRECTORA DE LA UNIDAD DE INVESTIGACIÓN  
FIQ-UNA - PUNO.

*Gregorio Palomino Cuello*  
Dr. Gregorio Palomino Cuello  
DIRECTOR ESCUELA PROFESIONAL  
FIQ-UNA



## DEDICATORIA

*A mis padres Oscar Ticona y Rosa  
Velarde hasta el cielo.*

*A mi pareja Beatriz por apoyarme y creer en  
mí, a mi hija Caroline Marissel por ser el  
motivo de superación y nunca rendirme.*

**Sergio Ticona Velarde**



## AGRADECIMIENTOS

*A Dios por guiar siempre mi camino y darme la fortaleza de seguir adelante, al área de RRSS de la MPSR – Juliaca, a mi asesor de tesis quien me pudo guiar hasta la culminación del proyecto, a la Universidad quien me abrió las puertas junto a sus docentes de la facultad y a los docentes que me apoyaron en la realización de este trabajo.*

**Sergio Ticona Velarde**



# ÍNDICE GENERAL

Pág.

**DEDICATORIA**

**AGRADECIMIENTOS**

**ÍNDICE GENERAL**

**ÍNDICE DE TABLAS**

**ÍNDICE DE FIGURAS**

**RESUMEN .....13**

**ABSTRACT.....14**

## **CAPÍTULO I**

### **INTRODUCCIÓN**

**1.1. OBJETIVO GENERAL .....17**

**1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....17**

## **CAPÍTULO II**

### **REVISIÓN DE LITERATURA**

**2.1. ANTECEDENTES .....18**

**2.2. MARCO TEÓRICO .....22**

2.2.1. El lixiviado .....22

2.2.2. Características de los lixiviados .....23

2.2.3. Origen de los lixiviados.....25

2.2.4. Composición de los lixiviados .....28

**2.3. TRATAMIENTOS DE LOS LIXIVIADOS .....29**

2.3.1. Recirculación.....29

2.3.3. Tratamiento fisicoquímico de coagulación/floculación .....31

2.3.4. Desestabilización de partículas .....32



2.3.5. Adsorción .....	35
2.3.6. Características principales de la adsorción.....	35
<b>2.4. COAGULACIÓN.....</b>	<b>38</b>
2.4.1. Teoría de la coagulación .....	40
2.4.2. Mecanismos de la coagulación.....	40
2.4.3. Principales coagulantes .....	41
<b>2.5. FLOCULACIÓN.....</b>	<b>45</b>
2.5.1. Tipos de floculación .....	46
2.5.2. Criterios de la Floculación .....	47
2.5.3. Tipos de floculadores .....	47
2.5.4. Aditivos tensioactivos .....	50

### CAPÍTULO III

#### MATERIALES Y MÉTODOS

<b>3.1. LUGAR DE ESTUDIO.....</b>	<b>52</b>
<b>3.2. MATERIALES.....</b>	<b>53</b>
3.2.1. Insumos .....	53
3.2.2. Instrumentos de laboratorio.....	53
3.2.3. Materiales de laboratorio.....	53
3.2.4. Reactivos .....	54
<b>3.3. MÉTODO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>54</b>
3.3.1. Técnicas de muestreo .....	54
<b>3.4. CARACTERIZACIÓN DEL LIXIVIADO Y GASES PROVENIENTES DEL BOTADERO DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS DE JULIACA, UBICADO EN EL DISTRITO DE CABANILLAS,</b>	



<b>PARCIALIDAD HUANUYO (FUNDO RÚSTICO SAN ANTONIO DE LIPICHINI) .....</b>	<b>55</b>
3.4.1. Composición del lixiviado en el botadero de la ciudad de Juliaca.....	55
<b>3.5. DETERMINACIÓN DEL TRATAMIENTO FÍSICO QUÍMICO MEDIANTE EL MÉTODO DE ADITIVO DE TENSIOACTIVO PARA TRATAR LOS LIXIVIADOS GENERADOS EN EL BOTADERO DE LA CIUDAD DE JULIACA.....</b>	<b>57</b>
3.5.1. Proceso de precipitación con tensioactivos.....	57
<b>3.6. DETERMINACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO PARA EL PROCESO DE RECUPERACIÓN DE HIERRO DEL LIXIVIADO Y GASES GENERADOS POR LOS RESIDUOS SÓLIDOS DEL BOTADERO DE LA CIUDAD DE JULIACA. ....</b>	<b>60</b>
3.6.1. Modelo matemático por experimentación y estadística. ....	60
3.6.2. Diseño factorial experimental .....	61
3.6.3. Rendimiento de recuperación de metales.....	62
3.6.4. Matriz del diseño factorial.....	63
3.6.5. Datos experimentales para la determinación del modelo matemático y análisis estadístico del hierro.....	64
3.6.6. Gases generados en el botadero de la ciudad de Juliaca .....	68

## **CAPÍTULO IV**

### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

<b>4.1. CARACTERIZACIÓN DEL LIXIVIADO Y GASES PROVENIENTES DEL BOTADERO DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS DE JULIACA, UBICADO EN EL DISTRITO DE CABANILLAS,</b>	
---	--



<b>PARCIALIDAD HUANUYO (FUNDO RÚSTICO SAN ANTONIO DE LIPICHINI) .....</b>	<b>72</b>
4.1.1. Caracterización del lixiviado.....	72
4.1.2. Determinación del tratamiento físico químico mediante el método de aditivos de tensioactivos para tratar los lixiviados y gases generados en el botadero de la ciudad de Juliaca. ....	73
4.1.3. Determinación del modelo matemático para el proceso de recuperación de hierro del lixiviado y gases generados por los residuos sólidos del botadero de la ciudad de Juliaca .....	74
4.1.4. Recuperación de lixiviado.....	75
4.1.5. Cantidad de gas producido en el botadero de la ciudad de Juliaca .....	86
<b>4.2. DISCUSIÓN .....</b>	<b>90</b>
<b>V. CONCLUSIONES.....</b>	<b>92</b>
<b>VI. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>94</b>
<b>VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>95</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>99</b>

**Area:** Medio Ambiente

**Linea :** Tecnologías Ambiental y Recursos Naturales

**Fecha de sustentacion: 29 de enero de 2024**



## ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
<b>Tabla 1.</b> Datos típicos sobre la composición del lixiviado de rellenos nuevos y maduros.....	29
<b>Tabla 2.</b> Toma de muestras de lixiviados de los R.S.U.-Juliaca .....	55
<b>Tabla 3.</b> Caracterización físico-química de los lixiviados de los R.S.U .....	57
<b>Tabla 4.</b> Tratamiento de adición de coagulante .....	58
<b>Tabla 5.</b> Condiciones de operación en los experimentos de coagulación-floculación .....	60
<b>Tabla 6.</b> Variables naturales-datos del diseño experimental .....	61
<b>Tabla 7.</b> Cálculo del % de rendimiento para el diseño factorial .....	63
<b>Tabla 8.</b> Matriz del diseño experimental.....	63
<b>Tabla 9.</b> Análisis de varianza .....	64
<b>Tabla 10.</b> Coeficiente de regresión para Y.....	65
<b>Tabla 11.</b> Resultados estimados para Y .....	65
<b>Tabla 12.</b> Optimizar respuesta.....	66
<b>Tabla 13.</b> Caracterización físico-química de los lixiviados de los R.S.U.....	72
<b>Tabla 14.</b> Concentración de hierro de la muestra tratada con aditivo tensioactivo (alquil benceno sulfonado) luego del proceso.....	73
<b>Tabla 15.</b> Producción de aguas lixiviados en el botadero .....	76
<b>Tabla 16.</b> Proyección de la población de la ciudad de Juliaca .....	78
<b>Tabla 17.</b> Producción per cápita de los residuos sólidos de la ciudad de Juliaca ...	80
<b>Tabla 18.</b> Generación de residuos sólidos de la ciudad de Juliaca.....	81
<b>Tabla 19.</b> Generación del acumulado del volumen de residuos sólidos de la ciudad de Juliaca.....	82
<b>Tabla 20.</b> Área requerida.....	84



<b>Tabla 21.</b> Composición química parte orgánica en base seca del botadero de la ciudad de Juliaca .....	86
<b>Tabla 22.</b> Cálculo de la composición molar de los elementos .....	87



## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1.</b> Formación de lixiviados.....	28
<b>Figura 2.</b> Naturaleza de un soluto.....	31
<b>Figura 3.</b> Esquema del proceso de coagulación-floculación.....	32
<b>Figura 4.</b> Doble capa eléctrica.....	34
<b>Figura 5.</b> Neutralización de cargas.....	39
<b>Figura 6.</b> Proceso de floculación.....	46
<b>Figura 7.</b> Botadero de residuos sólidos urbanos de Juliaca, ubicados en el Distrito de Cabanillas. Parcialidad Huanuyo (Fundo Rústico San Antonio de Lipichini).....	52
<b>Figura 8.</b> Proceso de coagulación-floculación.....	59
<b>Figura 9.</b> Diagrama de flujo de la prueba de jarras.....	59
<b>Figura 10.</b> Parapeto estandarizado para Y.....	66
<b>Figura 11.</b> Efectos principales para Y.....	67
<b>Figura 12.</b> Contornos de superficie de la respuesta estimada.....	67
<b>Figura 13.</b> Eficiencia de recuperación de Fe con coagulante $Al_2(SO_4)_3$ .....	74
<b>Figura 14.</b> Proyección de la población de la ciudad de Juliaca.....	78
<b>Figura 15.</b> Caracterización de residuos sólidos de la ciudad de Juliaca.....	79
<b>Figura 16.</b> Composición química parte orgánica en base seca del botadero de la ciudad de Juliaca.....	86
<b>Figura 17.</b> Poza de lixiviación.....	101
<b>Figura 18.</b> En la poza de lixiviación, Interior de la poza de lixiviación.....	101
<b>Figura 19.</b> Toma de muestras en la poza de lixiviado.....	102
<b>Figura 20.</b> Lixiviado derramándose, Lixiviado recogido.....	102



<b>Figura 21.</b> Toma de muestras en la poza de lixiviado .....	102
<b>Figura 22.</b> Preparando las muestras para determinar el pH .....	103
<b>Figura 23.</b> Determinando el pH de las muestras a trabajar .....	103
<b>Figura 24.</b> Pesando diferentes cantidades de sulfato de aluminio .....	104
<b>Figura 25.</b> Preparando las muestras con sulfato de aluminio como coagulante .....	104
<b>Figura 26.</b> Proceso de coagulación-floculación del lixiviado con sulfato de aluminio y Tensioactivo.....	105
<b>Figura 27.</b> Proceso de filtración de cada muestra del proceso de adsorción de Fe.	105
<b>Figura 28.</b> Proceso de filtración del lixiviado coagulado y floculado .....	106
<b>Figura 29.</b> Muestras listas para ser llevados a su análisis final.....	106



## RESUMEN

El estudio tuvo como propósito establecer el tratamiento de lixiviados y gases de los residuos sólidos del vertedero de Juliaca, en el Distrito de Cabanillas, Parcialidad Huanuyo, Provincia de San Román, Departamento de Puno. Se empleó la metodología de aditivos tensoactivos mediante el procedimiento de coagulación y agregación para recuperar hierro del lixiviado y gases generados por los residuos sólidos del vertedero, utilizando el equipo Jar-test. Cuatro muestras se recogieron directamente del vertedero en recipientes de polietileno de 250 cm<sup>3</sup>. Los resultados revelaron que la identificación de lixiviados reveló la existencia de hierro con una concentración de 1,56 mg/L, superando los límites máximos permitidos (LMP). Se utilizó sulfato de aluminio como agente coagulante y alquil benceno sulfonato como agente floculante para reducir la cantidad de hierro. El tratamiento de la concentración de hierro en el lixiviado se llevó a cabo mediante el método de coagulación y floculación, con una velocidad de agitación óptima de 150 rpm, durante 60 minutos a pH 10 y una dosis de coagulante de 80 mg/L. El modelo matemático arrojó un coeficiente de correlación R<sup>2</sup> del 89,24%, indicando que el proceso es adecuado. En cuanto a la cantidad de gases generados por el vertedero, se determinó que el metano (CH<sub>4</sub>) fue de 47 348,93 m<sup>3</sup>, el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) fue de 38 506,07 m<sup>3</sup> y el amoníaco (NH<sub>3</sub>) fue de 4 249,88 m<sup>3</sup>, con un total de 90 104,88 m<sup>3</sup>. En conclusión, el proceso permitió la recuperación de 0,098 mg/L de hierro, lo que representa el 93,72%, a través del proceso de tratamiento con sulfato de aluminio y alquil benceno sulfonato.

**Palabras clave:** Aditivos, gases, botadero, lixiviado, residuos sólidos.



## ABSTRACT

The purpose of the study was to establish the treatment of leachate and gases from the solid waste of the Juliaca landfill, in the district of Cabanillas, Huanuyo, Province of San Román, Department of Puno. The surfactant additive methodology was used through the coagulation and aggregation procedure to recover iron from the leachate and gases generated by the solid waste from the landfill, using the Jar-test equipment. Four samples were collected directly from the landfill in 250 cm<sup>3</sup> polyethylene containers. The results revealed that the leachate identification revealed the existence of iron with a concentration of 1.56 mg/L, exceeding the maximum permissible limits (MPL). Aluminum sulfate was used as a coagulating agent and alkyl benzene sulfonate as a flocculant to reduce the amount of iron. The treatment of the iron concentration in the leachate was carried out using the coagulation and flocculation method, with an optimum agitation speed of 150 rpm, for 60 minutes at pH 10 and a coagulant dose of 80 mg/L. The mathematical model yielded a correlation coefficient R<sup>2</sup> of 89.24%, indicating that the process is adequate. Regarding the amount of gases generated by the landfill, it was determined that methane (CH<sub>4</sub>) was 47 348.93 m<sup>3</sup>, carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) was 38 506.07 m<sup>3</sup> and ammonia (NH<sub>3</sub>) was 4 249.88 m<sup>3</sup>, for a total of 90 104.88 m<sup>3</sup>. In conclusion, the process allowed the recovery of

**Keywords:** Additives, gases. landfill, leachate, solid waste.



# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

Juliaca alberga a aproximadamente 278,444 habitantes, con una densidad poblacional de 422.04 hab./km<sup>2</sup>. El Reglamento del Decreto Legislativo N°1278, promulgado el 21 de diciembre de 2017, define los derechos, deberes, facultades y compromisos de la sociedad en su totalidad con relación a la administración de desechos sólidos. Su propósito es garantizar la gestión y manejo efectivos de estos desechos para minimizar riesgos ambientales y salvaguardar la salud.

Las reglas confieren a las autoridades locales la obligación de manejar los desechos sólidos provenientes de hogares y negocios y aquellos generados por actividades similares. Esto forma parte de un enfoque integral para asegurar un manejo adecuado y la prevención de riesgos ambientales, conforme a los lineamientos establecidos en el Decreto Legislativo mencionado.

El manejo de los residuos sólidos en Juliaca se enfrenta a complejidades significativas, ya que no ha evolucionado de manera paralela al aumento demográfico y al desarrollo económico, según datos del INE-2022. La administración de estos desechos trasciende los elementos técnicos de recopilación, higiene de vías y disposición definitiva; también conlleva la implementación de novedosos conceptos asociados al respaldo financiero de servicios, aspectos ligados a la salud del entorno y de las personas, educación, implicación de la comunidad, entre otros.

Aunque la cuestión de los desechos sólidos fue reconocida hace bastantes décadas, las soluciones aplicadas hasta el momento han sido incompletas, transformándolo en un asunto constante que, en la mayoría de las situaciones, incluso



ocasiona tensiones sociales, según indica Wehenpohi y sus colegas (2000).

Este panorama subraya la necesidad de abordar de manera integral y sostenible el tratamiento de los desechos sólidos en Juliaca. La presencia de vertederos conlleva la generación de lixiviados, ya que los residuos depositados en estos lugares experimentan descomposición a través de procedimientos fisicoquímicos y biológicos. A lo largo de este procedimiento, surge un líquido de salida como resultado de la filtración del agua pluvial a través de la capa de desechos, disolviendo diversos componentes de los desechos sólidos presentes. Como resultado, se origina un residuo líquido conocido como lixiviado, contaminado con una carga notable de sustancias orgánicas, metales de gran peso, nitrógeno amoniacal y/o sales inorgánicas. Este líquido filtrado presenta un tono oscuro o marrón profundo, un aroma desagradable y una elevada toxicidad.

La agrupación y agregación, dos procedimientos en la fase de aclaración del agua, involucran la inclusión de sustancias como sales metálicas o hidróxidos, como la cal, al líquido de salida. El propósito es desestabilizar la sustancia coloidal, provocando la agrupación de diminutas partículas para formar flóculos de mayor tamaño, facilitando así su eliminación por gravedad. Factores como La cantidad de aluminio, la categoría y cantidad de aniones, y la acidez (pH) influyen en la formación de flóculos. La efectividad del proceso se ve afectada por La cantidad y aplicación del agente coagulante, la acidez del agua, la intensidad iónica y la cantidad y características de los compuestos orgánicos (Dianderas, 2011).

La finalidad de la investigación es evidenciar que el manejo de lixiviados provenientes del depósito de desechos sólidos urbanos en Juliaca y la generación de gases, a través del método de coagulación y floculación, puede prevenir la



contaminación ambiental. El estudio busca caracterizar los lixiviados y gases, establecer la tecnología sugerida y revelar los tiempos ideales, coagulante y pH en dicha tecnología. Además, se pretende desarrollar una formulación matemática para el manejo de filtrados de desechos sólidos, proporcionando así una base técnica para abordar eficientemente la gestión de estos desechos en la ciudad.

### **1.1. OBJETIVO GENERAL**

Demostrar que el tratamiento de lixiviados y gases de los residuos sólidos del botadero de la ciudad de Juliaca, ubicado en el Distrito de Cabanillas, Parcialidad Huanuyo (Fundo Rústico San Antonio de Lipichini), mediante el proceso de aditivos de tensioactivos, reducirá y evitará la contaminación del medio ambiente.

### **1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Caracterizar los lixiviados y gases provenientes del botadero de residuos sólidos urbanos de Juliaca, ubicado en el Distrito de Cabanillas, Parcialidad Huanuyo (Fundo Rústico San Antonio de Lipichini).
- Determinar los tratamientos fisicoquímicos mediante el método de aditivos de tensioactivos para tratar los lixiviados generados en el botadero de Juliaca, ubicado en el Distrito de Cabanillas, Parcialidad Huanuyo (Fundo Rústico San Antonio de Lipichini).
- Determinar el modelo matemático para el proceso de recuperación de hierro del lixiviado y gases generados por los residuos sólidos del botadero de la ciudad de Juliaca.



## CAPÍTULO II

### REVISIÓN DE LITERATURA

#### 2.1. ANTECEDENTES

Pellón et al. (2009), en su investigación, los términos de DQO y DBO<sub>5</sub> tenían un elevado contenido de materia orgánica, la cantidad de coliformes fecales fue entre 104 y 105 NMP/100mL. De igual manera observaron que no existía mucha diferencia entre los diferentes lixiviados de otras ciudades los cuales fueron evaluados. En la temporada de lluvias, se registró un volumen de lixiviado de 42 m<sup>3</sup>/día, mientras que, durante la época seca, la cifra fue de 13 m<sup>3</sup>/día. Se implementó una tecnología específica que incluyó un tanque séptico, un filtro anaerobio y un sistema de lagunas. Esta intervención condujo a una significativa reducción de los contaminantes, expresados en términos de DQO y DBO<sub>5</sub>. La DQO disminuyó de 2011 a 75 mg/L, y la DBO<sub>5</sub> pasó de 902 a 30 mg/L, indicando una mejora notable en la calidad del lixiviado tratado mediante este sistema.

Según Dianderas (2011), la estrategia de oxidación bacteriana utilizada en el procesamiento de minerales auríferos sulfurados se basa en la eficaz actividad de la bacteria *Thiobacillus Ferrooxidans* para transformar compuestos sulfurados reducidos en sulfato, así como para oxidar el ion ferroso a ión férrico. Este autor ha usado el *Thiobacillus Ferrooxidans* en un entorno ácido que fue muy eficaz aeróbico, móvil y quimioautotráfico, los cuales tienen una forma de bastoncitos de 1 - 2 pulg de largo por 0,5 - 1,0 pulg de ancho, trabajo con temperaturas de 28 – 35 °C, presentando puntos isoeléctricos entre de 4,0 – 5,0. Este hallazgo resalta la versatilidad metabólica de



*Thiobacillus Ferrooxidans* en ambientes ácidos, contribuyendo al entendimiento de sus mecanismos bioquímicos y su potencial aplicado en diversos procesos.

Según Aliaga (2010), al utilizar el método Fenton, se observó una reducción de la sustancia orgánica, alcanzando un pH aceptable de 4, esto se debe porque en el tratamiento efectuado las dos concentraciones de peróxido de hidrógeno se generaba una disminución de material orgánico; a medida que el pH se elevaba a 5 con dosis elevadas de peróxido, la presencia de la materia orgánica era menos evidente. Aplicó el proceso de Coagulación – Floculación con el coagulante cloruro férrico, porque causa una disminución más significativa de la sustancia orgánica; en ambos procedimientos de Coagulación - Floculación se observó una reducción de alrededor del 55 % de los sólidos suspendidos en la muestra de agua, indicando la efectividad de ambos agentes coagulantes para reducir este indicador.

Cuchimaque *et al.* (2013), llevaron a cabo un estudio que demostró la eficacia en la eliminación de Fe y Mn del agua natural mediante la utilización de un material adsorbente conformado por zeolita natural (clinoptilolita) recubierta con Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y MnO<sub>2</sub>, obtenidos a partir de FeCl<sub>3</sub> y MnSO<sub>4</sub>, como corresponde. El análisis se centró en variables como el pH, el caudal en el afluente, las concentraciones de Fe y Mn, y la altura de la capa de zeolita en el proceso de eliminación a través de un sistema de filtración. Se determinó que las pruebas con variaciones en el flujo en la entrada y la elevación de la capa de zeolita resultaron ser los elementos más significativos en el procedimiento de remoción de Fe y Mn. Este hallazgo destaca la importancia de considerar estos criterios para optimizar la eficiencia del sistema de filtración.

Para este proceso las concentraciones utilizadas fueron 0,5 - 3,0 mg/L para Mn y 1,0 - 7,0 mg/L para Fe, siendo el rango del pH 6 a 10, la remoción disminuyó cuando



se aumentó la concentración de Fe, la causa de este fenómeno reside en la generación de precipitados de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  lo cual provocó una rápida saturación del entorno. Se lograron índices de eliminación más elevados al utilizar la capa de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

Teca et al. (2013), emplearon la técnica de coagulación/floculación para eliminar la DQO y partículas en suspensión mediante la inclusión de agentes coaguladores. Este enfoque demostró ser eficaz en la eliminación de DQO, sin embargo menos efectivo en la eliminación completa de partículas sólidas en suspensión debido a las bajas concentraciones de sólidos suspendidos en los lixiviados. Las dosis óptimas del proceso fueron 100 ppm de compuesto aniónico de poliacrilamida como agente aglutinante y entre 200 y 450 ppm de  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  como coagulador. En el transcurso del proceso, se lograron remociones del 55,48 % tanto para la turbidez como para la DQO, destacando la eficacia de los aditivos tensioactivos como elementos clave en el proceso de los lixiviados.

Méndez *et al.* (2009), en la investigación, concluyó que la remoción más eficiente es aquellos en la que se utiliza el proceso Fenton para la remoción mediante filtración que por sedimentación. Las proporciones más efectivas para  $[\text{Fe}^{2+}]/[\text{H}_2\text{O}_2]$  y  $[\text{DQO}]/[\text{H}_2\text{O}_2]$  fueron 0,6 y 9 respectivamente. En este estudio, se determinaron tiempos de contacto óptimos de 5 minutos para la eliminación de la DQO y una hora para la eliminación del color. Después del proceso de adsorción la eficiencia máxima fue de 100% para el color y 98,9% para la DQO, siendo el índice al cansado de biodegradabilidad final de 0,24 después de las pruebas Fenton.

Corena. (2008), los criterios físicos y químicos de interés como metales pesados, fueron evaluados cuando se procedió a monitorear los lixiviados del Relleno Sanitario El OASIS de la ciudad de Sincelejo, la cantidad de metales debido a la época



climatológica actual (época de sequía), presentan una variación moderadamente leve. En cuanto a los indicadores de DBO5 y DQO, se percibe que los niveles del lixiviado aumentan. La totalidad del fluido contaminante producido en el vertedero controlado debe someterse a tratamiento antes de ser descargado en un cuerpo de agua, ya sea en la superficie o en el subsuelo, mediante métodos de reconocida factibilidad técnica.

García *et al.* (2008), emplearon una combinación de diversos procesos, incluyendo el físico-químico, en el tratamiento del lixiviado. Después de someter el lixiviado tratado a un proceso de filtración A través de un sistema de filtros de cartucho, se llevó a cabo el proceso de ultrafiltración (UF). El filtrado obtenido de la ultrafiltración fue luego sometido a un procedimiento de ósmosis inversa (OI) en dos fases. En este proceso, se lograron rendimientos elevados, alcanzando un 99% de remoción para criterios como la DQO, el amonio y la conductividad.

En su investigación, García (2012) analizó la variación diaria en la composición del lixiviado que se filtra desde la fracción orgánica de residuos (FORSU) depositada en un túnel de fermentación en el Centro de Tratamiento de Residuos. Cada duplicado de la instalación de tratamiento de residuos sólidos urbanos (FORSU) permaneció en la galería de fermentación durante quince días. Estos hallazgos obtenidos indican que la cantidad de ciertos metales pesados (Mn, Zn y Pb) presentes en un lixiviado, generado a partir de residuos sólidos urbanos sometidos a un proceso biooxidativo [galería de fermentación], supera a la que exhibe el lixiviado obtenido de un residuo sólido urbano similar, o incluso con un contenido más elevado de metales pesados en el material original, sometido a un proceso anaeróbico [depósito sellado].

Zapata (2013), para unos mejores resultados propone que se evalúen los impactos que puedan tener los rellenos sanitarios de acuerdo a todas las operaciones,



propiedades fisicoquímicas del lixiviado, se debe crear una matriz con la importancia y clasificación en impactos críticos, moderados y severos, lo cual deberá permitir las actividades más influyentes y los elementos más influenciados. De igual manera las operaciones del relleno determinaron que éste impacta a los componentes físicos, generando alteraciones en la pureza del aire, reducción de la pureza del agua, trayendo como consecuencia la pérdida de flora acuática y terrestre.

## 2.2. MARCO TEÓRICO

### 2.2.1. El lixiviado

El filtrado es el líquido producido cuando el agua se infiltra a través de materiales permeables, conteniendo tanto materia en suspensión como disuelta, con mayor frecuencia asociado a rellenos sanitarios. En estos lugares, cuando llueve, el agua se mezcla con la basura y crea un líquido malo. Si un lugar para tirar basura no tiene un buen sistema para agarrar este líquido, puede irse al suelo y causar problemas para la naturaleza y para la salud. En general, este líquido es dañino, tiene cosas ácidas y muchas partes malas como hierro y otras cosas químicas. Su característico olor es distintivo y difícil de pasar por alto (Tchobanoglous *et al.*, 1994).

Los peligros relacionados con los líquidos percolados provienen de las concentraciones elevadas de contaminantes orgánicos y amoníaco nitrogenado. Se mencionan con frecuencia los microorganismos nocivos y sustancias tóxicas que podrían estar presentes como los más significativos. No obstante, la presencia de microorganismos patógenos disminuye velozmente con el tiempo en los vertederos, especialmente en el caso del líquido percolado reciente.



Desde una perspectiva geológica, este proceso implica la eliminación de los componentes solubles de una roca, sedimento o suelo por medio del agua de infiltración.

La combinación de desechos generados y consumidos por el ser humano es un factor significativo que contribuye a la formación de los llamados "lixiviados". Al unirse estos desechos, los líquidos resultantes se filtran hacia los acuíferos, generando la contaminación del agua y del suelo. Con el tiempo, esto puede llevar a la disminución de la producción en estos suelos debido a la contaminación (Tchobanoglous, *et al.* 1994).

### **2.2.2. Características de los lixiviados**

Los lixiviados se caracterizan generalmente mediante los criterios fundamentales que incluyen DQO, DBO5, la relación DBO5/DQO, pH, conductividad, sólidos totales (ST), sólidos disueltos totales (SDT), sólidos suspendidos totales (SST), nitrógeno completo y metales de alta densidad.

- **DQO**

La DQO es el criterio más exigente en el manejo de residuos disueltos, ya que representa la cantidad total de materiales reducidos en muestras acuosas. Dada la complicación de los residuos disueltos en un vertedero sanitario, se sabe poco sobre la aportación precisa de cada elemento al valor total de la DQO. No obstante, es fundamental estudiar la estructura de la DQO en los residuos disueltos, ya que esto puede enriquecer la comprensión de la distribución, conducta medioambiental y destino de cada componente específico (Tchobanoglous et al., 1995).



Según Qarani *Et. al.* (2010), las variaciones en los resultados de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) pueden atribuirse a diversos factores, tales como el diseño específico del vertedero sanitario, la composición de los desechos urbanos sólidos (DUS), las características particulares del lugar y la antigüedad del vertedero. La valoración de la Necesidad Química de Oxígeno (DQO) incluye la cuantificación del contenido de carbono orgánico total, excluyendo ciertos compuestos aromáticos, como el tolueno, que no sufren una oxidación completa en la reacción. El ensayo de DQO se basa en un procedimiento de oxidación-reducción, donde se reducen sustancias como tiosulfuros, sulfitos e iones ferrosos.

- **DBO<sub>5</sub>**

Es el criterio predominante en la descripción de la contaminación en aguas residuales y superficiales. La medición de la DBO<sub>5</sub> implica la cuantificación del oxígeno en solución consumido por los organismos diminutos durante el proceso de oxidación bioquímica de la sustancia orgánica (Qarani *et al.*, 2010).

La proporción DBO<sub>5</sub>/DQO sirve como indicador de la edad del lixiviado. Por lo general, la relación DBO<sub>5</sub>/DQO es más elevada en un lixiviado joven en comparación con uno maduro que ha experimentado procesos de equilibrio. Una proporción reducida DBO<sub>5</sub>/DQO sugiere que los residuos disueltos se encuentran en un estado constante y presenta una biodegradación más desafiante. En consecuencia, las técnicas y estrategias de tratamiento deben ajustarse según la relación para abordar eficientemente la composición y la edad del lixiviado (Qarani *et al.*, 2010).



- **pH.**

El pH de un lixiviado experimenta variaciones que dependen de su edad. Según la descripción de Tchobanoglous y colaboradores (1994), el pH del lixiviado tiende a disminuir a 5 o incluso menos durante la fase ácida debido a la presencia de ácidos orgánicos, para luego aumentar hasta alcanzar un número de 8 durante la etapa de desarrollo.

- **Capacidad eléctrica.**

La presencia de sales en una mezcla en solución está vinculada a la conductividad eléctrica en medios líquidos. La separación en componentes de estas sales produce iones cargados positivamente y negativamente, los cuales pueden llevar energía eléctrica cuando el líquido se expone a un campo eléctrico.

- **Sólidos Totales**

Es crucial dividir los contaminantes en dos categorías principales: sales disueltas totales y sólidos suspendidos totales, ya que muchos métodos de tratamiento solo abordan eficazmente uno de ellos. Las sales disueltas totales (SDT) hacen referencia a los sólidos que consiguen atravesar un filtro apropiado, mientras que los sólidos suspendidos totales (SST) son aquellos que quedan retenidos por el filtro. Esta distinción es esencial para aplicar enfoques de tratamiento específicos a cada tipo de contaminante (Collazos, 2008).

### **2.2.3. Origen de los lixiviados**

En el área del vertedero, los lixiviados tienen su origen en dos fuentes principales (Corbitt, 2003; Ehrigh, 1992; Tchobanoglous, *et. al*, 1994):



a) El líquido se produce a partir de la humedad natural de los desechos y la humedad entre partículas resultante de varios procesamientos o, alternativamente, se produce como consecuencia de la descomposición de las materias orgánicas presentes.

b) Se origina lixiviado proveniente de fuentes externas.

- Proviene de la precipitación que impacta directamente sobre los residuos sólidos.
- Se genera a partir del movimiento horizontal del agua que llega directamente al vertedero.
- Se produce cuando el nivel freático sube hasta un punto en el que las aguas subterráneas entran en contacto directo con la basura.
- Se produce cuando los líquidos entran o se filtran en el vertedero sanitario.
- La filtración es el desbordamiento de líquido que supera la capacidad del depósito para retener la humedad en este entorno.

Varios factores influyen en su producción, entre ellos:

- Agua accesible: Comprende la lluvia, la existencia de agua en la superficie, la reutilización de filtrados y el riego de la capa protectora.
- Atributos del revestimiento de los desechos: Incluye la clase de suelo y flora, así como el nivel de compresión del componente de la capa protectora.
- Atributos del tipo de desechos: Examina la compresión, composición y



nivel de humedad de los residuos al ser colocados.

- Sellado utilizado: Engloba el tipo de sustancia empleada, ya sea natural o artificial, tanto en la base como en la cubierta definitiva del depósito.

La cantidad de contaminantes producidos por un vertedero sanitario está directamente relacionada con la concentración de elementos presentes en el lixiviado. Esta concentración es resultado de las diversas sustancias depositadas en el vertedero, las cuales experimentan transformaciones con el tiempo. Además, la masa contaminante depende del volumen de lixiviado generado durante un período determinado. Las propiedades y velocidades de producción de filtrados son específicas para cada lugar y categoría de desperdicio, ya que se ven afectadas por la estructura de los desechos sólidos en la región, además de factores como la temperatura, la humedad y el nivel de acidez. La excelencia y medida del líquido que consigue infiltrarse en el área donde se localiza la basura también desempeñan un papel crucial en este proceso (Collazos, 2008).

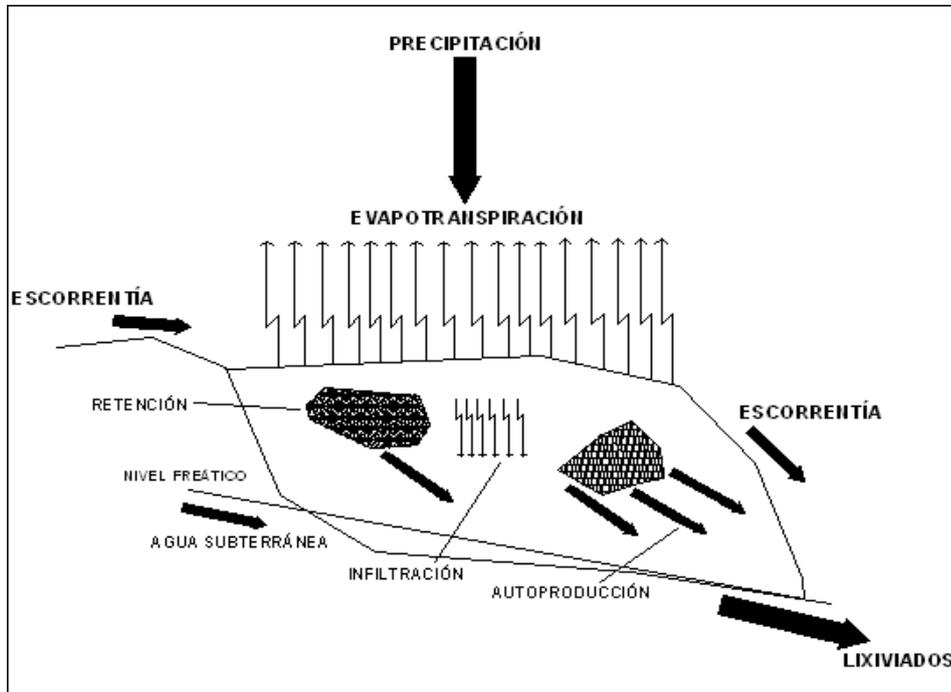
Un vertedero sanitario actúa a manera de un reactor bioquímico, con los desperdicios y el líquido como ingresos, y los principales productos de salida son gases y líquido lixiviado. “Este procedimiento surge de la preservación biológica de la mayoría de los elementos orgánicos durante la consolidación de los desperdicios sólidos” (Parra, 2007).

Contar con un conocimiento de los inicios, la producción y las categorías de desechos sólidos, junto con información sobre la estructura y las velocidades de generación, representa datos esenciales para la toma de decisiones en el campo de la planificación y diseño de sistemas de gestión y

eliminación definitiva de residuos (Tchobanoglous *et al.* 1995).

**Figura 1.**

*Formación de lixiviados*



Fuente: Castillo (1994)

#### **2.2.4. Composición de los lixiviados**

Según Corbitt (2003), el lixiviado se define como un flujo hídrico que ha surgido o penetrado por entre los desechos sólidos, llevando consigo materiales solubles, en suspensión o en emulsión extraídos de los desperdicios sólidos (ver tabla 1).

**Tabla 1.**

*Datos típicos sobre la composición del lixiviado de rellenos nuevos y maduros*

Componente	Relleno nuevo (< 2 años)		Relleno maduro (> 10 años)
	Intervalo	Típico	
DBO <sub>5</sub>	2000–30000	10000	100 – 200
Carbono Orgánico Total (COT)	1500–20000	6000	80 – 160
DQO	3000–60000	18000	100 – 500
STS	200 – 2000	500	100 – 400
Nitrógeno Orgánico	10 – 800	200	80 – 120
Nitrógeno Amoniacal	10 – 800	200	20 – 40
Nitrato	5 – 40	25	5 – 10
Fósforo Total	5 – 100	30	5 – 10
Fósforo en ortofosfato	4 – 80	20	4 – 8
Alcalinidad como CaCO <sub>3</sub>	1000–10000	3000	200 – 1000
Potencial Hidrógeno	4,5 – 7,5	6	6,6 – 7,5
Dureza total como CaCO <sub>3</sub>	300 – 10000	3500	200 – 500
Calcio	200 – 3000	1000	100 – 400
Magnesio	50 – 1500	250	50 – 200
Potasio	200 – 1000	300	50 – 400
Sodio	200 – 2500	500	100 – 200
Cloruro	200 - 3000	500	100 – 400
Sulfato	50 - 1000	300	20 – 50
Hierro Total	50 – 1200	60	20 – 200

Todas las unidades están en miligramos por litro, excepto el pH.

Fuente: Tchobanoglous et al., (1994).

## 2.3. TRATAMIENTOS DE LOS LIXIVIADOS

### 2.3.1. Recirculación

La práctica de devolver los lixiviados a la parte superior del relleno sanitario ha sido ampliamente empleada en años anteriores, siendo una de las opciones de tratamiento más económicas según Renous et al. (2008). La recirculación del lixiviado tiene el efecto de diluir y reducir los compuestos producidos por la actividad biológica, así como mediante otras reacciones químicas y procesos físicos que ocurren en el vertedero. A modo de ilustración, los ácidos orgánicos básicos que se encuentran en el filtrado se transformarán



en CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>. La elevación del pH en el vertedero debido a la producción de CH<sub>4</sub> conlleva a la precipitación de metales, reteniéndolos dentro del vertedero. El reciclaje de lixiviados no solo ofrece la ventaja adicional de recuperar el gas del vertedero, que contiene CH<sub>4</sub>, sino que también suele aumentar la tasa de producción de gas en comparación con sistemas que no reciclan lixiviados. Con el fin de prevenir liberaciones no reguladas de gases del vertedero durante el tratamiento de lixiviados reciclados, se sugiere dotar el depósito con un mecanismo de captación de gas. Al final, se precisará recopilar, procesar y expulsar el filtrado residual. En vertederos extensos, puede resultar necesario contar con estructuras para el resguardo de los lixiviados, según Tchobanoglous et al. (1994). No obstante, Renous et al. (2008) sostiene que el reflujo de considerables volúmenes de filtrados puede acarrear consecuencias negativas como saturación, acumulación de agua y condiciones ácidas. La saturación de lixiviados al recircularlos puede obstruir el desplazamiento de gases del vertedero, generando un incremento en la presión interna y situaciones de funcionamiento riesgosas.

### **2.3.2. Proceso de clarificación primaria**

El tratamiento fisicoquímico conocido como clarificación primaria se fundamenta en la coagulación/floculación como un fenómeno de superficie. En este proceso, se emplean aditivos coagulantes y floculantes con propiedades tensoactivas. La tensión superficial está directamente relacionada con la proporción y la índole de un soluto.

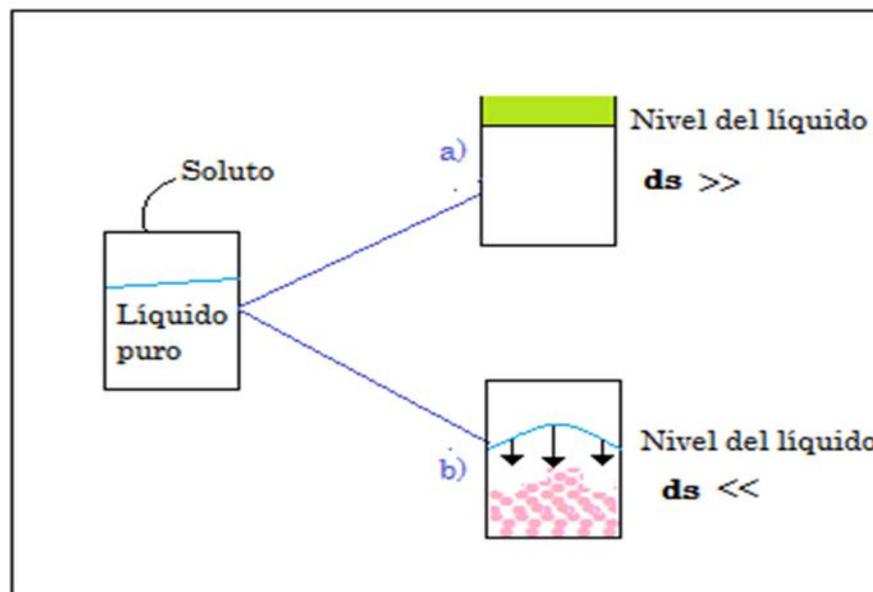
Los solutos con propiedades tensoactivas negativas son elementos iónicos tales como NaCl, Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>, FeCl<sub>3</sub>, y se distinguen uno del otro según

su densidad de carga (Química Superior Ambiental, 2011).

La Figura 2 ilustra que en la representación "a" (representado en verde), hay una mayor extensión superficial, lo que resulta en la concentración del soluto en la superficie. Mientras tanto, en el caso "b" (representado en rosa), hay una menor extensión superficial debido a que el soluto se acumula en el fondo y contrae la superficie.

### Figura 2.

*Naturaleza de un soluto*



Fuente: Química Superior Ambiental (2011)

### 2.3.3. Tratamiento fisicoquímico de coagulación/floculación

Los lixiviados, con diversas composiciones, contienen material suspendido, que puede consistir en sólidos que sedimentan en inmóviles o en sólidos dispersos que no decantan fácilmente, como los coloides. Cada partícula de los coloides se mantiene inmutable debido a una sucesión de cargas del mismo signo en su superficie, creando un efecto de rechazo entre partículas

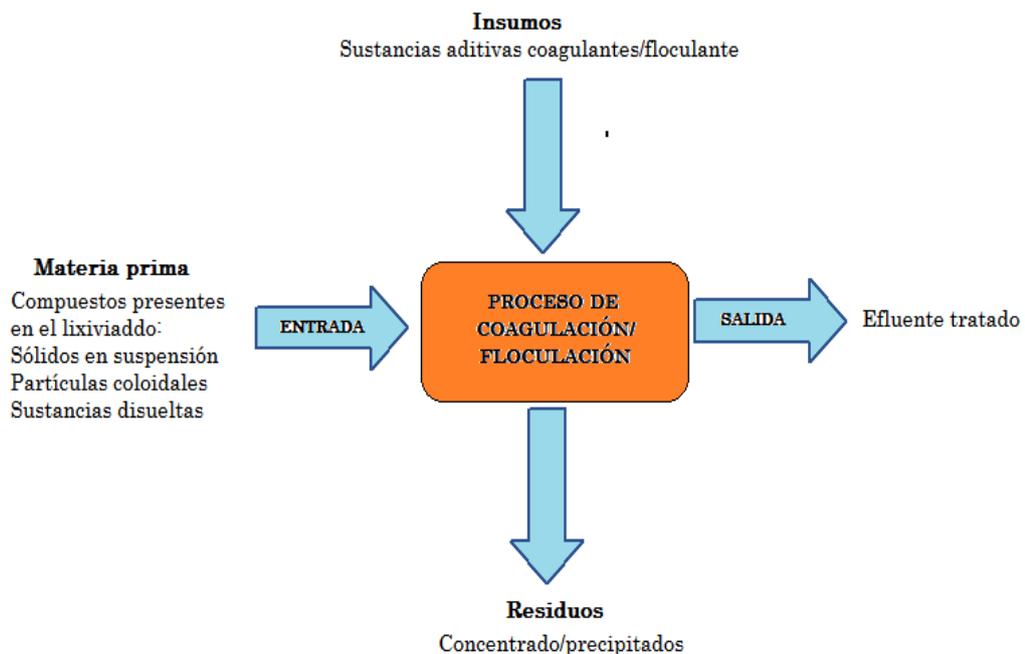
contiguas, similar al rechazo entre dos polos magnéticos. Esto evita que las partículas colisionen y se agrupen en masas más grandes, conocidas como flóculos, impidiendo así su sedimentación.

“La coagulación/floculación constituye un método químico y físico por el cual las partículas sumamente diminutas se desequilibran y se conglomeran para simplificar su sedimentación” (Henry y Heinke 1999).

### Proceso químico de coagulación/floculación en la materia.

**Figura 3.**

*Esquema del proceso de coagulación-floculación*



#### 2.3.4. Desestabilización de partículas

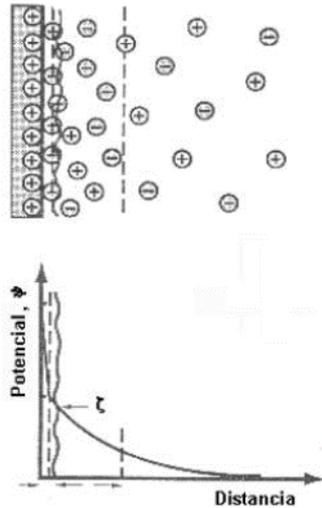
Se origina una dispersión coloidal cuando una sustancia, que no se disuelve en el medio, se dispersa en partículas diminutas. Algunas sustancias orgánicas, aunque consideradas solubles, generan dispersiones coloidales en lugar de soluciones reales. Debido a su tamaño extremadamente reducido, la relación entre su área superficial y masa es considerable, lo que lleva a la



predominancia de fenómenos superficiales. Las partículas coloidales tienen una masa tan mínima que los efectos gravitacionales resultan insignificantes. Cada partícula coloidal posee una carga eléctrica, cuya magnitud varía según la índole del material coloidal, ya sea positiva o negativa. La firmeza de los coloides se vincula estrechamente con su carga eléctrica, ya que partículas con la misma carga se repelen, evitando la formación de aglomerados. Debido a su extensa superficie, los coloides actúan como potentes adsorbentes. Algunas dispersiones coloidales son estables debido a un proceso denominado adsorción selectiva o preferencial, en el que determinados tipos de partículas se adhieren a las superficies en función de las cargas que transportan. Las partículas de una suspensión coloidal tienen una carga superficial anormalmente alta debido a la ionización de sus grupos funcionales o a la adsorción de iones adicionales de su medio de dispersión. La sobrecarga de carga en la superficie incide en la disposición de iones en el contexto, atrayendo iones de signo opuesto hacia la superficie y repeliendo los de igual signo. Este fenómeno termodinámico origina una distribución de carga alrededor de la partícula, conformando una organización de doble estrato eléctrico, tal cual en la Figura 4 (Henry y Heinke 1999).

#### Figura 4.

#### Doble capa eléctrica



La designación de doble capa se atribuye a la presencia de dos regiones con propiedades distintas: una capa rígida, cercana al área, compuesta mediante iones fuertemente unidos y de grosor reducido, y una capa difusa más extensa, donde la influencia termodinámica promueve una migración iónica más orientada. La capa difusa se caracteriza por formar una atmósfera iónica alrededor de la partícula. Las características de los iones adheridos en la capa inflexible determinan el voltaje eléctrico en la región que separa ambas capas, y este puede variar según la esencia del entorno. “Es posible evidenciar que, a lo largo de la capa dispersa, el voltaje eléctrico disminuye de forma aproximadamente exponencial respecto a la distancia  $r$ . Esta observación puede ser representada a través de la siguiente fórmula” (Henry y Heinke 1999),

$$\varphi(r) = \varphi_0 \exp(-kr) \quad \text{Ec. 2}$$

El aumento de la concentración de electrolito puede significativamente comprimir la capa difusa, reduciendo la firmeza de la partícula coloidal ante



posibles eventos de agrupamiento. Este acontecimiento promueve el inicio de los procesos de coagulación, floculación y sedimentación. La coagulación de coloides se produce cuando la compresión de la doble capa alcanza un tamaño umbral, lo que hace que las fuerzas de atracción superen las interacciones repulsivas entre las partículas.

“La desestabilización de partículas puede alcanzarse a través de tres métodos: (1) reducción de la doble capa mediante la introducción de un electrolito, (2) absorción y anulación de la carga, y (3) ajuste en la concentración de los iones que impactan en el potencial” (Eckenfelder, 1989).

### **2.3.5. Adsorción**

La adsorción es la acumulación de partículas como iones o moléculas en la extensión de un sólido o líquido. En cuanto a iones, la conexión se ve influenciada por la categoría del ión (anión o catión), así como por su carga y dimensión. “Esta condición de superficie, evidente en la actual retención del metal, puede manifestarse por medio de procesos físicos (adsorción física) o mediante enlaces químicos” (Quimisorción), (Sun-Kou *et al*, 2014).

### **2.3.6. Características principales de la adsorción**

- Es muy específica.
- Tiene un procedimiento veloz, la cual se eleva con la temperatura, pero decrece con la cantidad adsorbida.
- Automático.

#### **2.3.1.1. Adsorción física o fisorción**

Cuando las interacciones se categorizan como dipolo-dipolo,



dipolo-dipolo inducido o fuerzas de dispersión, se utiliza el término adsorción física o fisisorción. “Este tipo de adsorción carece de especificidad, ya que las fuerzas de atracción de las moléculas hacia las superficies sólidas son bastante débiles. La energía requerida para la adsorción física no excede 1 Kcal/g.mol. Estas fuerzas decrecen rápidamente” (Sun-Kou *et al.*, 2014).

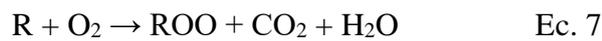
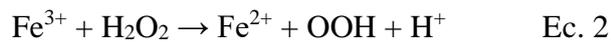
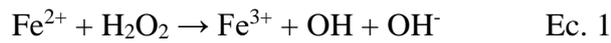
### **2.3.1.2. Adsorción química o quimisorción**

La adsorción química o quimisorción se utiliza cuando las fuerzas aparecen como enlaces covalentes. En este tipo de adsorción selectiva existen fuerzas de atracción mucho mayores que en la adsorción física, y el proceso es bastante especializado. “Las fuerzas que atraen a las moléculas adsorbidas son muy similares a las fuerzas de valencia que existen entre los átomos de las moléculas. Mediante el modelo de Langmuir se estudian estas interacciones”. (Sun-Kou *et al.*, 2014).

### **2.3.1.3. Oxidación Química**

La aplicación extensa de los procedimientos de oxidación química se ha empleado para la descomposición de compuestos orgánicos perjudiciales (Sun-Kou *et al.*, 2014).

En presencia de un catalizador como el hierro (Fe), el peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) produce radicales hidroxilos (OH), aquellos que interactúan con la sustancia orgánica, disminuyéndola de acuerdo con el siguiente proceso de reacción:



“El  $\text{Fe}^{3+}$  generado actúa como un coagulante altamente efectivo para eliminar constituyentes de gran peso molecular mediante la adsorción en los agregados formados de  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  en un pH neutro” (Jiang et al., 2011). El rendimiento económico de las aplicaciones de oxidación química sugiere llevar a cabo “una oxidación parcial de los compuestos orgánicos persistentes para aumentar su biodegradabilidad. La oxidación con  $\text{H}_2\text{O}_2$  suele realizarse a un pH de 3.5, ya que esto coincide con la velocidad máxima de generación de radicales libres en los sistemas  $\text{H}_2\text{O}_2$  donde  $\text{Fe}^{2+}$ , donde  $\text{Fe}^{2+}$  (también conocido como reactivo Fenton)” actúa en calidad de catalizador (Eckenfelder, 1989).

#### 2.3.1.4. Membranas

La purificación se caracteriza como la segregación de dos o más elementos en un líquido, principalmente fundamentada en disparidades de dimensión. La tarea primordial de una membrana es actuar como una barrera selectiva, facilitando el tránsito de ciertos elementos y reteniendo otros en una combinación de compuestos. Así, ya sea el permeado o la fase retenida se enriquecen en uno o más componentes. En esta situación, la membrana puede ser definida como la zona



intermedia situada entre dos etapas, o como la etapa que actúa como una barrera para supervisar o limitar el desplazamiento de masa, ajustando el tránsito de una o varias especies a través de ella. La membrana puede hallarse en fase gaseosa, líquida o sólida, o en combinaciones de estas.

Las membranas pueden ser clasificadas por

- La clasificación de la membrana: orgánica o artificial.
- La estructura de la membrana: permeable o impermeable, sus propiedades morfológicas o si es en estado líquido.
- El propósito de la membrana: segregación en etapa gaseosa, gas-líquido, líquido-líquido, entre otros.
- El modo de funcionamiento de la membrana: de absorción y dispersión, cambio de iones, osmótico, o no específico (inerte).

Las membranas también tienen la capacidad de modificar física o químicamente las sustancias del flujo a través de ellas (a través de intercambio iónico o membranas bioactivas), llevar a cabo la conducción de corriente eléctrica, evitar la saturación (por ejemplo, en aplicaciones empaquetadas o recubiertas) o controlar la velocidad de paso del flujo (en tecnologías de descarga) (Yáñez, 2007).

## 2.4. COAGULACIÓN

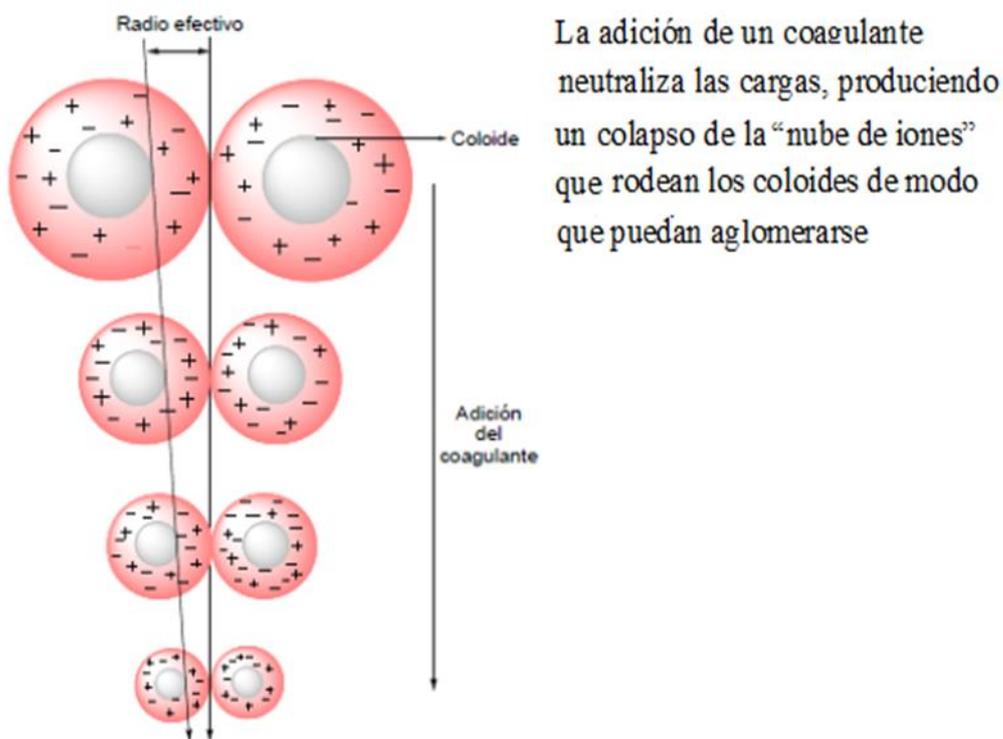
Se refiere a un método de desestabilización química de partículas en suspensión que se consigue al contrarrestar las fuerzas que las mantienen dispersas, promoviendo su aglomeración en microfloculaciones. Esto se consigue mediante la incorporación de agentes coagulantes y el uso de energía de agitación. La efectividad de las unidades

de decantación se cree que depende de la cantidad de coagulante, y se considera imposible lograr una clarificación adecuada si la dosis de coagulante no está ajustada correctamente (Yáñez, 2007).

La Figura 5 representa cómo las sustancias químicas anulan las cargas eléctricas en la superficie del coloide, facilitando la unión de partículas coloidales para dar lugar a la formación de flóculos.

### Figura 5.

Neutralización de cargas



Fuente: Yáñez (2007)

Este procedimiento se emplea para:

- Suprimir la turbidez orgánica o inorgánica que no puede precipitarse de manera veloz.
  - Excluir el color real y color percibido.
  - Erradicar bacterias, virus y organismos patógenos que pueden ser separados mediante coagulación.



- Aniquilar algas y plancton en términos generales.
- Suprimir compuestos que causan sabor y aroma, a veces provenientes de precipitados químicos suspendidos en otros.

#### **2.4.1. Teoría de la coagulación**

Las partículas presentes en la turbidez y coloración de las aguas naturales exhiben cargas eléctricas, generando así fuerzas de repulsión mutua, lo que resulta en su permanencia suspendidas y distanciadas en el agua. Esta es la razón por la cual estas partículas no experimentan sedimentación.

La agrupación de estas partículas forma un sistema coloidal que implica una doble capa de iones, Expuesto a un potencial en la superficie inferior de la doble capa, conocido como potencial Z. El desafío en el proceso de coagulación reside en disminuir el potencial Z a través de uno de los métodos siguientes:

- Coagulación al neutralizar la carga eléctrica.
- Coagulación al disminuir el grosor de la doble capa.

Una serie de complejos procesos químicos, algunos de los cuales siguen siendo un misterio, llevan a cabo el proceso de desestabilización.

Entre estas reacciones se incluyen aquellas que ocurren con las distintas formas de alcalinidad, resultando en la disminución de lo que contiene. “Adicionalmente, ciertas de estas reacciones generan CO<sub>2</sub>, cuyo impacto reside principalmente en el aumento de la acidez del agua resultando en la reducción del pH” (Bautista, 2007).

#### **2.4.2. Mecanismos de la coagulación**

De acuerdo con Tapia (2007), la desestabilización puede lograrse a través de los mecanismos físico-químicos siguientes:

- Entendimiento de la doble estratificación.



- Captación y anulación de cargas.
- Captura de partículas en un sedimento.
- Captación y creación de vínculos.

### 2.4.3. Principales coagulantes

Los coagulantes principales empleados para desestabilizar las partículas y generar el floc son:

- Aluminato de Sodio
- Cloruro de Aluminio
- Cloruro Férrico
- Sulfato de Aluminio
- Sulfato Férrico
- Sulfato Ferroso

Las sales más utilizadas son las de aluminio y hierro, que, al combinarse con el agua, desencadenan una cascada de reacciones complejas. En lugar de iones, los subproductos de la hidrólisis son más eficaces en este tipo de reacciones. Los hidróxidos de aluminio o hierro, que no se disuelven sino que forman precipitados, son los subproductos de la reacción de las sales con la alcalinidad del agua. (Tapia, 2007)

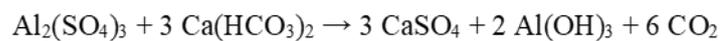
- **Sulfato de aluminio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$ )**

El coagulante más comúnmente empleado es el sulfato de aluminio, un sólido cristalino grisáceo conocido como alúmina o alumbre. Su interacción con la alcalinidad y los fosfatos en el agua resulta en la formación de flóculos pequeños y esponjosos. A causa de la composición de estos grupos de partículas, no se emplea en la precipitación inicial de aguas residuales con una elevada carga contaminante. A pesar de esta limitación, se aplica extensamente

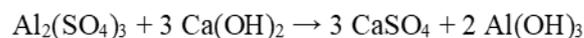


en el tratamiento de agua para consumo y en la disminución de coloides orgánicos y fósforo. La coagulación óptima ocurre en un rango de pH de 5,0 a 7,5. En el tratamiento de aguas residuales, la dosis recomendada varía de 100 a 300 g/m<sup>3</sup>, dependiendo de la clase de agua residual y los estándares de calidad exigidos (Tapia, 2007).

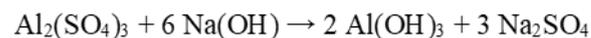
- Sulfato de aluminio (líquido o sólido).



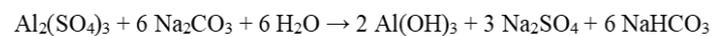
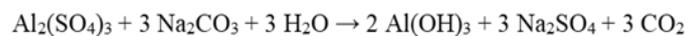
- Sulfato de aluminio + cal:



- Sulfato de aluminio + soda cáustica:



- Sulfato de aluminio + carbonato sódico:



#### 2.4.3.1. Cloruro de aluminio (AlCl<sub>3</sub>)

“Se encuentra en estado sólido o líquido, siendo preferible la forma líquida con una densidad de 1,29 kg/m<sup>3</sup>, igual a un contenido de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> del 11,4%. Se destacan las reacciones asociadas con el cloruro de aluminio” (Tapia, 2007)

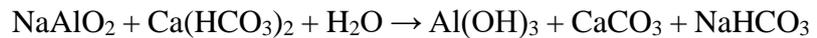


#### 2.4.3.2. Reacciones de aluminato sódico

El uso de este coagulante es limitado, siendo más comúnmente aplicado para la eliminación de tono a un pH bajo. Asimismo, se puede emplear en el proceso de ablandamiento de agua mediante la adición de



cal (Tapia, 2007)

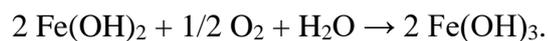


#### 2.4.3.3. Sulfato ferroso ( $\text{FeSO}_4$ )

“Por lo general, se emplea en combinación con cal ( $\text{CaO}$ ) o cloro para lograr una coagulación eficiente. La reacción entre el  $\text{FeSO}_4$  y la cal hidratada se favorece a un pH elevado”, según señala Tapia (2007). El rango óptimo de pH para la aglomeración se sitúa alrededor de 9,5.



En el proceso de aclaración, se requieren cantidades de 10 a  $100\text{g}/\text{m}^3$  de agente químico comercial  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ . En el manejo de aguas servidas, en ambientes con aireación, el hidróxido ferroso experimenta oxidación, convirtiéndose en hidróxido férrico.

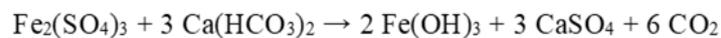


#### 2.4.3.4. Sulfato férrico ( $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ )

Está a la venta en forma de gránulos de tonalidad marrón rojiza. Este compuesto es sumamente soluble en agua y puede interactuar tanto con la alcalinidad inherente del agua como con sustancias alcalinas adicionales, como la cal. Generan flóculos de considerable tamaño y densidad, los cuales sedimentan de manera rápida. Por este motivo, se aconseja tanto en la precipitación inicial como en la coprecipitación de aguas servidas urbanas o industriales.



Además, se emplea en el tratamiento de aguas para consumo, aunque en ciertos casos puede generar inconvenientes de pigmentación. El intervalo de pH para lograr una aglomeración óptima es entre 4 y 7, y superior a 9. La cantidad recomendada varía de 10 a 150 gramos por metro cúbico de agente químico comercial  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  con cal. (Tapia, 2007)



#### **2.4.3.5. Cloruro férrico ( $\text{FeCl}_3$ )**

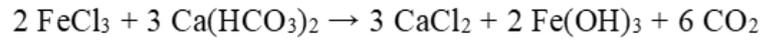
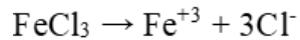
Puede hallarse en estado sólido o líquido, produciéndose mediante la oxidación de sulfato ferroso con cloro. Su aplicación se extiende al tratamiento de aguas residuales e industriales. Su uso se amplía al manejo de aguas servidas y de origen industrial. Experimenta interacciones tanto con la alcalinidad natural del agua como con sustancias alcalinas adicionales. Estos polímeros con carga positiva desequilibran las partículas coloidales cargadas negativamente en el agua, reduciendo las fuerzas repulsivas entre ellas.

El proceso inicia la formación de partículas grandes, las cuales se entrelazan y se agrupan. La masa resultante posee una densidad superior a la del agua a tratar, permitiendo su eliminación mediante sedimentación y filtración, según lo señalado por Tapia (2007).

El pH óptimo para la coagulación se sitúa en un rango entre 4 y 6, y es preferible que sea mayor a 8. Dosis de 5 a 160  $\text{g}/\text{m}^3$  de reactivo comercial  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  con cal.



Aunque es un coagulante energético, su aplicación puede ocasionar problemas de coloración en el agua.

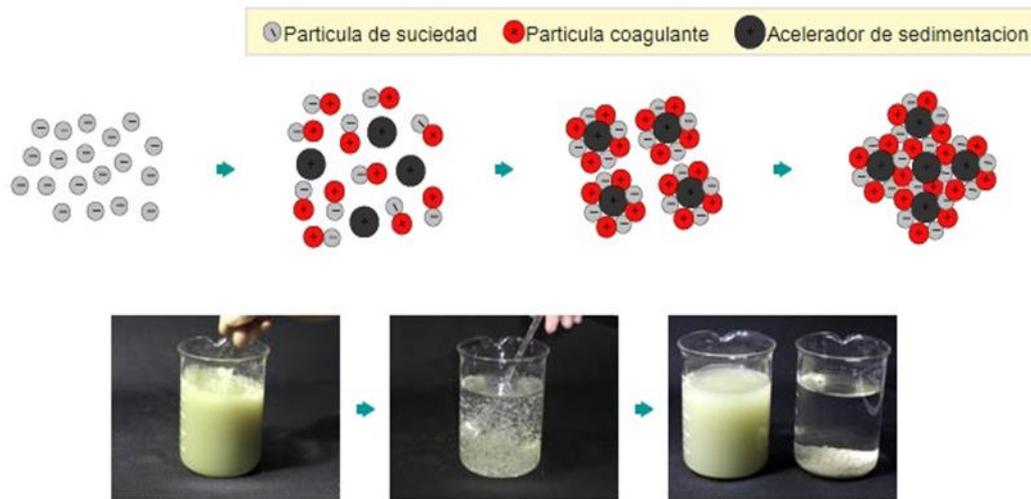


## 2.5. FLOCULACIÓN

Es la etapa que sucede a la coagulación y se basa en agitar la masa coagulada. Este procedimiento facilita el desarrollo y la unión de los grupos recién generados, con la meta de incrementar su tamaño y peso para conseguir una sedimentación eficaz. Los flóculos, que inicialmente son pequeños, se fusionan gradualmente formando aglomerados más grandes capaces de sedimentar. La aglutinación se beneficia de una agitación pausada, que posibilita la conexión gradual de los grupos. Una agitación excesivamente vigorosa puede desintegrarlos, impidiendo su formación en dimensiones y consistencia ideales. Es importante destacar que la aglutinación no solo amplía las dimensiones de las partículas del grupo, sino que también eleva su peso (Sánchez *et al.*, 2004).

**Figura 6.**

*Proceso de floculación*



Fuente: Sánchez *et al.*, (2004)

### 2.5.1. Tipos de floculación

Hay 2 categorías de aglutinación:

- **Floculación Pericinéctica**

Este desplazamiento es consecuencia del movimiento inherente de las moléculas del agua, y es provocado por la energía térmica. Este fenómeno se denomina el movimiento browniano.

- **Floculación Ortocinéctica**

Este procedimiento se basa en las interacciones entre partículas, las cuales son provocadas por el desplazamiento del agua. Este desplazamiento es ocasionado por una energía externa a la masa de agua, la cual puede tener origen mecánico o hidráulico. Después de la coagulación del agua, es vital que se realice la agrupación de los microfloculos. Para lograr esto, primero se produce la floculación pericinéctica, seguida por la floculación ortocinéctica.



### 2.5.2. Criterios de la Floculación

Los factores que definen la floculación incluyen:

- Características de densidad y tamaño de los flóculos.
- Floculación Ortocinética, determinada por el nivel de agitación proporcionado, ya sea mecánica o hidráulica.
- Gradiente de Velocidad, que representa la energía necesaria para inducir la mezcla.
- Recuento de colisiones, que se refiere a la interacción entre microflóculos.
- Período de retención, indicando la duración que el agua permanece en la unidad de floculación.
- Volumen de lodos, asegurando que los conglomerados generados no sedimenten en las unidades de floculación.

### 2.5.3. Tipos de floculadores

- Según Cárdenas (2000), se dividen en pausados y veloces.
- En la clasificación de Cánepa (2000), se presentan de la siguiente manera:

En términos de potencia, se subdividen en sistemas hidráulicos y mecánicos, así como en el contacto de sólidos, siendo el de capa de lodos el más reconocido.

Según Cárdenas (2000), los floculadores más empleados son los de potencia, destacando en nuestro país los hidráulicos debido a su eficiencia energética reducida y su mantenimiento sencillo. En contraste, en naciones industrializadas, es común la preferencia por floculadores automatizados, según Ritcher (1992).



Los floculadores hidráulicos usan como provecho la energía del agua para llevar a cabo las etapas de coalescencia y agrupación. No obstante, presentan las desventajas de contar con una menor capacidad de control, según señala Irwin (2008).

De acuerdo con Aliaga (2010), la clasificación de los floculantes incluye:

- Minerales, como la sílice activada, reconocida como un floculante destacado con la capacidad de asociarse a sales de aluminio, siendo especialmente útil en el tratamiento de agua potable.
- Naturales, que son macromoléculas de cadena extensa y considerable peso molecular, pudiendo derivar de fuentes naturales o ser producidas artificialmente.

Los agentes floculantes naturales provienen de sustancias como alginatos (extraídos de algas), almidones (obtenidos de granos vegetales) y derivados de la celulosa. A pesar de ello, su eficacia es relativamente limitada. En contraposición, los floculantes sintéticos son moléculas de cadena extensa, solubles en agua, obtenidas mediante la combinación de monómeros sintéticos simples. Algunos de estos monómeros presentan cargas eléctricas o grupos ionizables, por lo que se les conoce como polielectrolitos.

Según el carácter iónico de estos grupos activos, se establecen las siguientes distinciones:

- Polielectrolitos no iónicos: Se refieren a poliacrilamidas con una masa molecular que varía entre 1 y 30 millones.
- Polielectrolitos aniónicos: “Están caracterizados por la presencia de grupos ionizados negativamente, como los grupos carboxílicos”.



- Polielectrolitos catiónicos: Se caracterizan por contar con una carga eléctrica positiva en sus cadenas, la cual se origina por la presencia de grupos amino.
- Es a través de las pruebas de jarrest como se elegirá el polielectrolito correcto.
- Es posible clasificar la función de los polielectrolitos en tres áreas principales:
  - El primer grupo incluye los polielectrolitos, que reducen las cargas de las partículas y actúan como coagulantes. Los polielectrolitos catiónicos se utilizan para esta función debido a la naturaleza de carga negativa de las partículas de las aguas residuales.
  - En su segundo mecanismo de acción, los polielectrolitos facilitan la formación de enlaces entre partículas. Cuando las partículas se adsorben en un polímero común, crean estos enlaces, que hacen crecer las partículas por interconectividad.
  - Una acción de coagulación por formación de enlaces es el tercer modo de funcionamiento, y se consigue utilizando polielectrolitos catiónicos de alto peso molecular. Estos polielectrolitos no sólo disminuyen la carga, sino que también enlazan las partículas entre sí.
- **Botadero**

Área de acumulación incorrecta de desechos sólidos en vías públicas y áreas comunes, tanto en entornos urbanos como rurales o terrenos vacíos, que implica peligros para la salud o el medio ambiente. Estas áreas no cuentan con la aprobación sanitaria, según lo establecido en la Ley 27314 de 2000.



- **Disposición final**

Acciones o procedimientos destinados a gestionar o eliminar en un sitio los residuos sólidos, constituyendo la fase final de su manejo de manera permanente, segura desde la perspectiva de la salud y el entorno ambiental. Estas prácticas están reguladas por la Ley 27314 de 2000.

- **Generador**

Individuo o entidad legal que, debido a sus operaciones, produce residuos sólidos en calidad de productor, importador, distribuidor, comerciante o usuario. Se incluirá en la categoría de generador a aquel que posea desechos sólidos peligrosos cuando no sea factible identificar al creador original, además de los organismos municipales basándose en las tareas de recogida. Esta definición está conforme a la Ley 27314 de 2000.

- **Gestión de residuos sólidos**

Conjunto de medidas técnicas y administrativas que incluyen la planificación, coordinación, negociación, elaboración, ejecución y evaluación de políticas, estrategias, planes y programas para el manejo apropiado de los desechos sólidos a nivel nacional, regional y local. Esta definición se encuentra en concordancia con la Ley 27314 de 2000.

#### **2.5.4. Aditivos tensioactivos**

Un catión, a menudo un metal alcalino o un amonio cuaternario, y un anión anfipático son los subproductos de la descomposición del complemento tensioactivo.

Los jabones (sales sódicas de ácidos grasos), los agentes generadores de espuma (como el lauril sulfato), los agentes humectantes (del tipo



sulfosuccinato) y los dispersantes (del tipo lignosulfonato) son ejemplos de limpiadores artificiales que entran en esta categoría.

## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

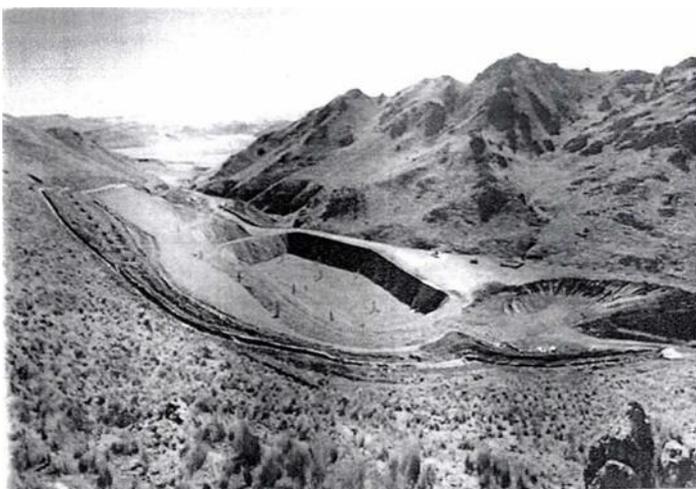
#### 3.1. LUGAR DE ESTUDIO

La investigación actual sobre el proceso de coagulación-floculación con aditivos tensioactivos se llevó a cabo en el Laboratorio de Control de Calidad de Aguas de la Facultad de Ingeniería Química de la UNA - Puno.

- Se extrajeron las muestras del vertedero de desechos sólidos urbanos en la ciudad de Juliaca, situado en el Distrito de Cabanillas, Parcialidad Huanuyo (Fundo Rústico San Antonio Lipichini). Los estudios del lixiviado del vertedero se realizaron en el Laboratorio de Control de Calidad de Aguas de la Facultad de Ingeniería Química de la UNA - Puno.

#### **Figura 7.**

*Botadero de residuos sólidos urbanos de Juliaca, ubicados en el Distrito de Cabanillas. Parcialidad Huanuyo (Fundo Rústico San Antonio de Lipichini).*





- La fase experimental se llevó a cabo mediante el procedimiento de coagulación-floculación, ejecutado en el laboratorio de Control y Calidad de Aguas de la Facultad de Ingeniería Química de la UNA - Puno.

**Ubicación:**

Provincia : Puno  
Departamento : Puno  
Dirección : Av. Sesquicentenario N° 1150

**3.2.MATERIALES**

**3.2.1. Insumos**

Líquidos filtrados provenientes del vertedero de desechos sólidos urbanos de Juliaca, depositados en el área designada en el Distrito de Cabanillas, Parcialidad Huanuyo (Fundo Rústico San Antonio de Lipichini).

**3.2.2. Instrumentos de laboratorio**

- Balanza analítica, Modelo METTLER TOLEDO AB2 04, Capacidad máxima 210 g, Precisión mínima 10 mg.
- Dispositivo "Jar-test", Modelo CAT M6.1 (0-1600) rpm
- Medidor de pH, Marca FISHER SCIENCE EDUCATION
- Sistema de filtración, con papel de filtro de 0,45µm

**3.2.3. Materiales de laboratorio**

- Atomizadores.
- Embudos de vidrio con tallo largo.
- Matraces Erlenmeyer de 100 y 250 mL.
- Paleta de acero inoxidable.
- Papel de filtro de distintos tipos.
- Pipetas de medición de 5, 10 y 15 mL.



- Recipientes de 100 mL.
- Recipientes de precipitados de 100 y 400 mL.
- Soporte universal de madera para embudos.
- Varillas de agitación.

#### **3.2.4. Reactivos**

- Agua destilada.
- Alquil benceno sulfonato.
- Hidróxido de sodio.
- Sulfato de aluminio.

### **3.3. MÉTODO EXPERIMENTAL**

#### **3.3.1. Técnicas de muestreo**

Los insumos consisten en el lixiviado generado por la cantidad de desechos orgánicos provenientes del vertedero de residuos sólidos urbanos de Juliaca, situado en el Distrito de Cabanillas, Parcialidad Huanuyo (Fundo Rústico San Antonio Lipichini). Para el proceso de investigación, se extrajeron 4 muestras de diversos puntos en el vertedero.

La recolección se realizó siguiendo las directrices establecidas en la Norma Peruana OS.090 para Instalaciones de Tratamiento de Aguas Residuales, especialmente en lo que respecta a la captura y conservación de muestras. Se tomaron muestras en envases de 250 mL, llenándolos hasta el borde durante unos 10 segundos sin permitir la entrada de aire atmosférico. Posteriormente, se taparon de inmediato sin agitar, con el fin de evitar la formación de burbujas, y se analizaron sin demora, siguiendo las indicaciones de Garay et al. (1993).



Con el objetivo de obtener una muestra representativa, se eligieron lugares con un flujo constante; la elección del lugar de muestreo se basó en los problemas planteados y los objetivos establecidos. En la Tabla 2, se detalla la cantidad de muestras recolectadas y el volumen promedio de las 4 muestras.

**Tabla 2.**

*Toma de muestras de lixiviados de los R.S.U.-Juliaca*

<b>N° de muestra</b>	<b>Hora</b>	<b>Cantidad de muestra (mL)</b>
1	10h00	250
2	10h30	250
3	11h00	250
4	11h30	250

### **3.4. CARACTERIZACIÓN DEL LIXIVIADO Y GASES PROVENIENTES DEL BOTADERO DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS DE JULIACA, UBICADO EN EL DISTRITO DE CABANILLAS, PARCIALIDAD HUANUYO (FUNDO RÚSTICO SAN ANTONIO DE LIPICHINI)**

#### **3.4.1. Composición del lixiviado en el botadero de la ciudad de Juliaca**

Las muestras de lixiviado utilizadas en nuestra investigación fueron extraídas del vertedero de residuos sólidos urbanos de Juliaca, localizado en el Distrito de Cabanillas, Parcialidad Huanuyo (Fundo Rústico San Antonio de Lipichini). Este vertedero se distingue por estar protegido por un techo que abarca toda su extensión, con un área superficial de 2,310 m<sup>2</sup> para las celdas y 3,400 m<sup>2</sup> en total. Presenta un volumen de 70,000 m<sup>3</sup> y cuenta con una poza designada para los lixiviados.



La localidad de Juliaca, con una población de 278,444 habitantes en el año 2022, produce una cantidad media de 183,774.00 kg/día de desechos sólidos, los cuales son depositados en el vertedero a diario. El volumen de lixiviado está principalmente vinculado a la lluvia. No solo la escorrentía contribuye a su formación, sino también las lluvias que caen en la zona del vertedero, ya sea directamente sobre los residuos acumulados o mediante un aumento de la infiltración a través de las grietas en el terreno.

La estimación de la producción de lixiviados se fundamentó en la tabla de generación de aguas lixiviadas en distintas circunstancias, elaborada por el Servicio Alemán de Cooperación Social-Técnica DED (consultar Anexo B, ítem 6). El lixiviado se caracteriza principalmente por su baja biodegradabilidad, representada por la relación DBO/DQO, y por su color marrón-negro profundo.

Se llevó a cabo el procesamiento de lixiviados del depósito de Desechos Sólidos Urbanos (RSU) en un entorno de laboratorio. La elaboración de las muestras para su análisis, tanto previo a la inclusión de tensoactivos como durante la etapa experimental, ocurrió en el Laboratorio de Garantía de Calidad del Agua en la Facultad de Ingeniería Química de la UNA – Puno.

**Tabla 3.**

*Caracterización físico-química de los lixiviados de los R.S.U*

<b>Componente</b>	<b>Resultado (mg/L)</b>
Hierro	1,56
Sulfatos	95
Nitratos	7
Amoniaco	0,47
DQO	3500

Fuente: Laboratorio de Control de Calidad de Aguas de la Facultad de Ingeniería Química de la UNA – Puno

### **3.5. DETERMINACIÓN DEL TRATAMIENTO FÍSICO QUÍMICO MEDIANTE EL MÉTODO DE ADITIVO DE TENSIOACTIVO PARA TRATAR LOS LIXIVIADOS GENERADOS EN EL BOTADERO DE LA CIUDAD DE JULIACA.**

#### **3.5.1. Proceso de precipitación con tensioactivos**

La secuencia que se siguió fue la siguiente:

Se confeccionaron cuatro muestras de 150 mL de lixiviado en cuatro recipientes de precipitados con agitación.

1. Se llevó a cabo la incorporación del polielectrolito o coagulante (sulfato de aluminio) miligramo por miligramo hasta apreciar una formación adecuada de coágulos. Se administraron diversas dosis para alcanzar concentraciones de 50, 60, 70 y 80 mg/L.

La mezcla se agitó a 150 revoluciones por minuto (rpm) durante un período de 30 a 60 minutos para cada muestra.



**Tabla 4.**

*Tratamiento de adición de coagulante*

<b>Nº de Pruebas</b>	<b>Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> (mg/L)</b>	<b>pH (escalar)</b>	<b>Tiempo (min)</b>
1	50	5	30
2	60	6	40
3	70	9	50
4	80	10	60

Se registró la concentración de la sustancia empleada y se midió el nivel de pH.

1. Luego, en cada recipiente del dispositivo de ensayo de jarras, se introdujo alquil benceno sulfonato como floculante, ajustando el pH de cada muestra a diversos niveles. (5, 6, 9, 10).
2. Se procedió a mezclar de forma rápida a 25 rpm durante un período de 12 minutos, registrando el tiempo en el cual se formaron los flóculos.
3. Se permitió que la muestra sedimentara durante 30 minutos. Una vez formados los precipitados, se llevó a cabo la decantación y se procedió con la filtración del contenido de los recipientes, extrayendo muestras para analizar las concentraciones y la absorbancia del hierro y la DQO (Demanda Química de Oxígeno).

Las muestras fueron remitidas al Laboratorio de Garantía de Calidad del Agua en la Facultad de Ingeniería Química de la UNA – Puno para su análisis de contenido de hierro.

## Diagrama de flujo del proceso de coagulación-floculación

Figura 8.

Proceso de coagulación-floculación

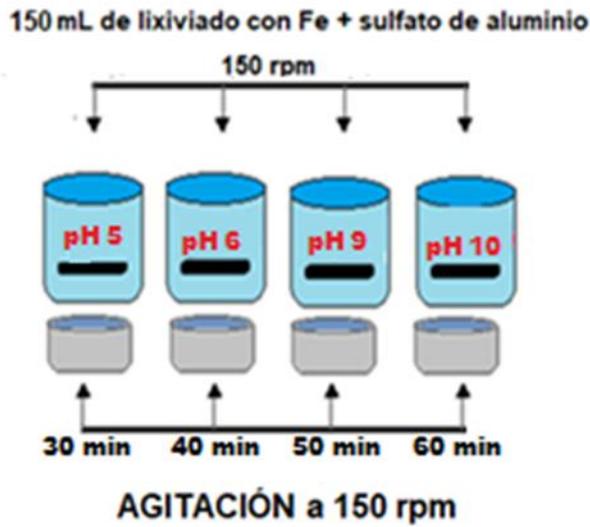
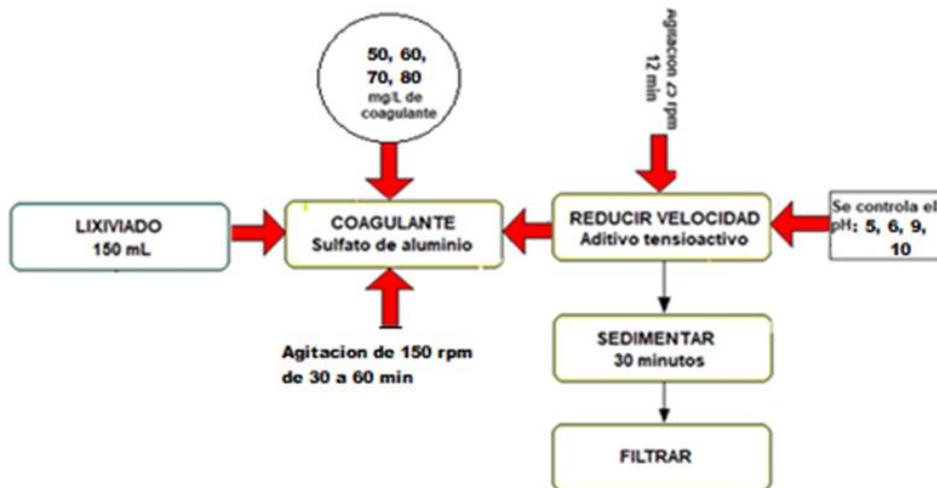


Figura 9.

Diagrama de flujo de la prueba de jarras



**Tabla 5.**

*Condiciones de operación en los experimentos de coagulación-floculación*

COAGULACIÓN	FLOCULANTE
50 - 80 mg/L $Al_2(SO_4)_3$ (10 %)	20 mg/L de alquil benceno sulfonato
Velocidad de agitación: 150 rpm	Velocidad de agitación: 25 rpm
Tiempo:30 a 60 min	Tiempo:12 min

### **3.6. DETERMINACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO PARA EL PROCESO DE RECUPERACIÓN DE HIERRO DEL LIXIVIADO Y GASES GENERADOS POR LOS RESIDUOS SÓLIDOS DEL BOTADERO DE LA CIUDAD DE JULIACA.**

#### **3.6.1. Modelo matemático por experimentación y estadística.**

Esta técnica estadística es utilizando el programa Statgraphics Centurión XVI, facilita la planificación eficiente de la experimentación, de manera que con un número reducido de ensayos se pueda establecer la importancia de cada una de las variables independientes evaluadas, comprender el efecto de sus interacciones y desarrollar un modelo matemático empírico. Este modelo sirve como principio para una fase subsiguiente de optimización del proceso.

Para nuestro caso tomamos tres factores con dos niveles, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$N = 2^k$$

**Donde:**

N = Número total de experimentos

$k$  = Número de variables

Se requieren los siguientes números de experimentos:

$$N = 2^3 = 8 \text{ experimentos.}$$

Donde se tomó en cuenta el número de pruebas el cual se recomendó, se trabajó con cuatro experimentos según el siguiente diseño experimental:

**Tabla 6.**

*Variables naturales-datos del diseño experimental*

VARIABLES	SIMBOLO	UNIDAD	NIVEL (-)	NIVEL (+)
			INFERIOR	SUPERIOR
Coagulante [Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> ]	X <sub>1</sub>	mg/L	50	80
pH	X <sub>2</sub>	Escalar	5	10
Tiempo	X <sub>3</sub>	minutos	30	60

El modelo parte de la premisa de cierta linealidad y debería tener la capacidad de prever de manera eficaz todos los puntos de diseño. Por lo tanto, hemos identificado tres variables, mediante pruebas exploratorias, que impactan positivamente en la recuperación de metales al agregar aditivos tensioactivos. Estas variables son: Coagulante, pH y permanencia temporal en el reactor, como se especifica en la tabla 6.

### 3.6.2. Diseño factorial experimental

#### - Formulación y propósito

Para un diseño factorial  $2^3$  que implica tres factores o variables originales (concentración, pH y tiempo), y cada factor con tres niveles ( $k = 3$ ), el modelo matemático es el siguiente:



$$Y=b_0+b_1X_1+b_2X_2+b_3X_3+b_4X_1X_2+b_5X_1X_3+b_6X_2X_3+b_7X_1X_2X_3$$

**Dónde:**

Y = Variable respuesta Rendimiento

X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub>, X<sub>3</sub> = Variables codificadas de entrada de coagulante,  
pH y tiempo.

X<sub>1</sub>X<sub>2</sub>, X<sub>1</sub>X<sub>3</sub>, X<sub>2</sub>X<sub>3</sub>, = Interacciones entre las tres variables principales

X<sub>1</sub>X<sub>2</sub>X<sub>3</sub>

En primer lugar, se determinaron los valores de X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub> y X<sub>3</sub> en función de las variables de entrada del proceso. Luego, se calcularon los valores de b<sub>0</sub>, b<sub>1</sub>, b<sub>2</sub>, b<sub>3</sub>, ..., b<sub>7</sub> (estimadores de los coeficientes de regresión) en relación con la variable de respuesta, Rendimiento de extracción (Y).

### 3.6.3. Rendimiento de recuperación de metales

La incógnita de salida en el esquema factorial se mide en relación al porcentaje de eficacia de hierro obtenido, y este porcentaje se estableció de la siguiente manera:

$$\% \text{ RENDIMIENTO} = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100$$

Dónde:

W<sub>1</sub> = Peso inicial de Fe

W<sub>2</sub> = Peso de Fe recuperado

**Tabla 7.***Cálculo del % de rendimiento para el diseño factorial*

N° de Prueba	W <sub>1</sub> (mg/L)	W <sub>2</sub> (mg/L)	RENDIMIENTO %
1	1,56	0,66	57,69
2	1,56	0,64	58,97
3	1,56	0,41	73,72
4	1,56	0,098	93,72

La tabla 7 indica que se trabajó con la cantidad de hierro de la solución proveniente de los desechos sólidos de la ciudad de Juliaca que contiene 1,56 mg/L, obteniéndose un rendimiento para cada proceso o número de prueba, siendo el mejor rendimiento la prueba 4 con un valor de 93,72%.

#### 3.6.4. Matriz del diseño factorial

Con los valores proporcionados en la tabla 7, se determinó la cantidad de ensayos experimentales a llevar a cabo, combinando los valores más alto y más bajo de los 3 factores definidos. En este caso, se llevó a cabo el trabajo de investigación con un total de cuatro experimentos.

**Tabla 8.***Matriz del diseño experimental*

N° DE PRUEBA	DISEÑO	COMBINACION DE NIVELES			RENDIMIENTO % “Y”
		X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	
1	[1]	50	5	30	57,69
2	a	80	5	30	58,97
3	b	50	10	60	73,72
4	ab	80	10	60	93,72



Siguiendo la matriz del diseño factorial, se llevaron a cabo 4 pruebas o corridas, combinando las tres variables independientes, cumpliendo así con la condición de ortogonalidad. Posteriormente, se utilizó el programa estadístico Statgraphics Centurion XVI para analizar los resultados.

### 3.6.5. Datos experimentales para la determinación del modelo matemático y análisis estadístico del hierro

Este modelo numérico resume los resultados de la adaptación a un diseño factorial estadístico asociado a la capacidad del material adsorbente.

**Tabla 9.**

*Análisis de varianza*

<b>Fuente</b>	<b>Suma de Cuadrados</b>	<b>Gl</b>	<b>Cuadrado Medio</b>	<b>Razón-F</b>	<b>Valor-P</b>
A: Coagulante	7,7618	1	7,7618	0,05	0,8326
B: pH	13,9392	1	13,9392	0,09	0,7775
C: Tiempo	93,845	1	93,845	0,62	0,4767
Error total	610,344	4	152,586		
Total (corr.)	725,89	7			

R-cuadrada = 93,718 porciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 89,1268 porciento

Error estándar del est. = 1,32885

Error absoluto medio = 0,81375

Estadístico Durbin-Watson = 1,83641 (P=0,3198)

Autocorrelación residual de Lag 1 = -0,125772

Después de ajustes, el coeficiente de determinación, R-Cuadrada, indica que el modelo revela el 93,7867% de la variabilidad en Y. Por otro lado, el R-

cuadrada ajustado, que es más relevante para comparar modelos con diferente número de variables independientes, llega al 89,1268%. El desviación típica de la estimación revela que la desviación típica de los restos es 1,32885.

**Tabla 10.**

*Coefficiente de regresión para Y*

<b>Coefficiente</b>	<b>Estimado</b>
constante	85,86
A: Coagulante	-0,0218889
B: pH	-0,33
C: Tiempo	-0,0978571

La ecuación del modelo ajustado es

$$Y = 85,86 - 0,0218889 * \text{Coagulante} - 0,33 * \text{pH} - 0,0978571 * \text{Tiempo}$$

**Tabla 11.**

*Resultados estimados para Y*

	<b>Observados</b>	<b>Ajustados</b>	<b>Inferior 95,0%</b>	<b>Superior 95,0%</b>
<b>Fila</b>	<b>Valores</b>	<b>Valores</b>	<b>para Media</b>	<b>para Media</b>
1	69,54	83,6725	59,4213	107,924
2	82,95	81,7025	57,4513	105,954
3	85,33	81,0325	56,7813	105,284
4	87,65	79,0625	54,8113	103,314

Este cuadro presenta detalles sobre los valores de Y originados mediante el modelo adaptado. La tabla comprende:

- (1) los datos registrados de Y (si los hay)
- (2) la estimación de Y según el modelo adaptado
- (3) intervalos de confianza del 95,0% para la media de la respuesta

Cada elemento corresponde a los valores de los factores experimentales en una fila específica de su conjunto de datos.

**Tabla 12.**

*Optimizar respuesta*

<i>Factor</i>	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	<i>Óptimo</i>
Coagulante	50,0	80,0	80,0
pH	5,0	10,0	10,0
Tiempo	30,0	60,0	60,0

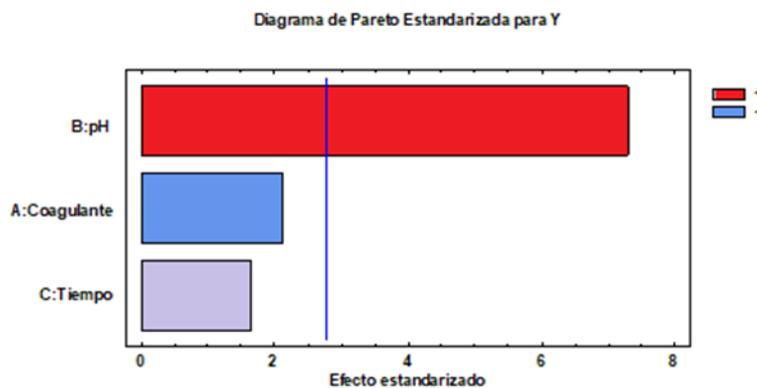
Meta: maximizar Y

Valor óptimo = 89,237

Este cuadro presenta la configuración de los niveles de los factores, la cual optimiza Y dentro de la región señalada.

**Figura 10.**

*Parapeto estandarizado para Y*

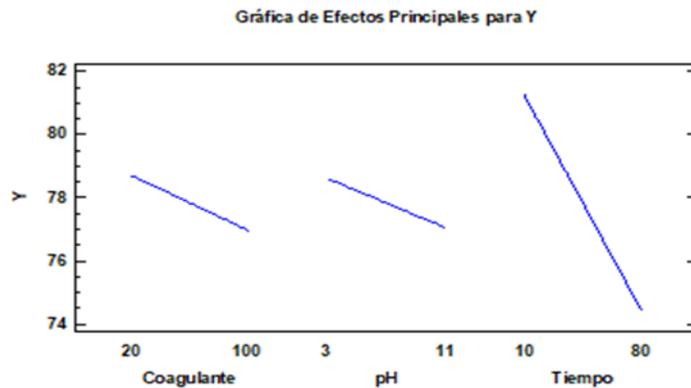


Esta representación gráfica se ha generado utilizando la información de la tabla 8, que detalla los impactos calculados y las relaciones entre las variables pH, coagulante y tiempo. De estos, el pH emerge como la variable más significativa para la respuesta, ya que cualquier alteración en esta afecta de manera más pronunciada a la variable Y.

La línea azul delimita el rango de variación del sistema, mientras que los colores denotan la representatividad de las variables y sus agrupaciones. No se observa evidencia de correlación secuencial en los restos.

**Figura 11.**

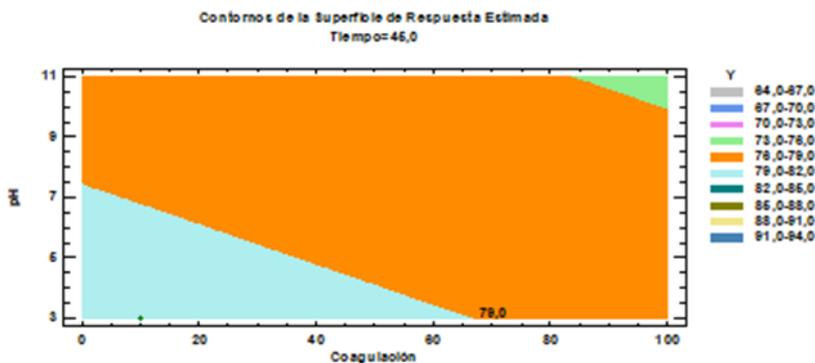
*Efectos principales para Y*



La ilustración en la figura 11 muestra la falta de interacción entre las variables, lo que sugiere que son independientes y concuerda con la superficie de respuesta. Esto señala que la inclinación vinculada a todas las variables es negativa.

**Figura 12.**

*Contornos de superficie de la respuesta estimada*





Examinando el gráfico mediante las líneas de nivel (isolineas), se puede interpretar lo siguiente: El valor óptimo para el coagulante es de 80 mg/L, el tiempo de 60 miN. y un pH de 10.

Esta visualización exhibe la trayectoria ascendente, señalando ubicaciones propicias para llevar a cabo experimentos adicionales en caso de que el objetivo sea incrementar o reducir la eficiencia.

En el marco de la recuperación de hierro, la respuesta ideal o eficacia más destacado se representa mediante el color azul, con un valor específico de 89,24%.

### **3.6.6. Gases generados en el botadero de la ciudad de Juliaca**

Para determinar la cantidad de gases que se generan en el botadero de la ciudad de Juliaca es necesario seguir los pasos que a continuación se detallan.

#### **- Caracterización de los residuos sólidos que se generan en la ciudad de Juliaca**

La producción de residuos sólidos generados por los habitantes se ve influenciada por el método más adecuado de separación para establecer la composición física promedio, así como por los lixiviados y gases, lo que determina la caracterización de los residuos. Esta caracterización facilitó la determinación de la cantidad total de residuos generados y la proyección de datos para los próximos años, permitiendo así la planificación de acciones para calcular los gases generados en el vertedero sanitario de la ciudad de Juliaca. Se emplearon como materia prima inicial los desechos sólidos municipales de la ciudad de Juliaca provenientes de la población.

## Proyección de la población

Es esencial determinar la población futura que experimentará la ciudad de Juliaca en los próximos 10 años, con el fin de calcular la cantidad diaria y anual de desechos sólidos municipales, así como la estimación de la cantidad de lixiviados y gases que estos producen.

En la proyección de la población, se ha implementado un crecimiento geométrico, empleando una tasa de crecimiento del 0,87 % anual (índice de crecimiento para la ciudad de Juliaca según el INEI). La siguiente fórmula nos proporciona la capacidad de calcular las necesidades para los siguientes 10 años.

$$P_f = P_o (1 + r)^n \quad \text{Ec. 1}$$

Dónde:

$P_f$  = Población futura

$P_o$  = Población actual

$r$  = Tasa de crecimiento de la población

$n$  = (t final – t inicial) intervalo en años

$t$  = variable tiempo (en años)

- 1er año  $P_1 = 278\,444$
- 2do año  $P_2 = 278\,444 (1+0,87)^1 = 280\,866$
- 3er año  $P_3 = 278\,444 (1+0,87)^2 = 283\,316,77$

En los resultados y la discusión se puede observar la suma total de la estimación de la población.

### - Cantidad generada per cápita de residuos sólidos de la ciudad de Juliaca

Con el propósito de lograr este objetivo, se han considerado los siguientes

criterios:

La producción per cápita y la producción total de desechos sólidos, originados por la población de 278,444 habitantes de la ciudad de Juliaca, se calcularon de la siguiente manera:

$$ppc = \frac{\text{Cantidad de residuos}}{\text{población}} \quad \text{Ec.2}$$

$$ppc1 = \frac{183\,774,00 \frac{\text{kg}}{\text{día}}}{278\,444 \text{ pobladores}} = 0,660 \text{ kg/hab. día}$$

La estimación de los desechos por persona para los siguientes 10 años se realiza mediante la ecuación 2. Se prevé que la producción per cápita aumentará en un 1% anual. Así que, para el segundo y tercer año, se tiene:

$$ppc_2 = ppc_1 + (1\%) = 0,660 \times (1,01) = 0,6666 \text{ kg/hab/día}$$

$$ppc_3 = 0,387 + (1\%) = 0,6666 \times (1,01) = 0,6732 \text{ kg/hab/día}$$

De igual manera se calcula para los demás años.

#### - **Generación de residuos sólidos de la ciudad de Juliaca**

Se aconseja calcular las cantidades de desechos generadas por la población mediante la producción per cápita. La producción per cápita (ppc) de desechos sólidos es un criterio que conecta el tamaño de la población con actividades comerciales, institucionales, educativas, de limpieza pública, entre otras, y es una variable crucial para dimensionar los procesos.

La estructura de desechos urbanos de la ciudad de Juliaca se muestra, y la generación anual se determina multiplicando la producción cotidiana de desechos sólidos (ppc) por los 365 días del año.

$$R.S. \text{ anual} = \frac{0,660 \text{ kg}}{\text{pob} - \text{día}} * 278\,444 \text{ pob} = 183\,774,00 \frac{\text{kg}}{\text{día}}$$

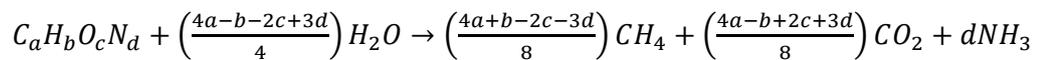


La generación de RSM de los 278 444 habitantes en el año 2022 fue de 183 774,00 Kg/día.

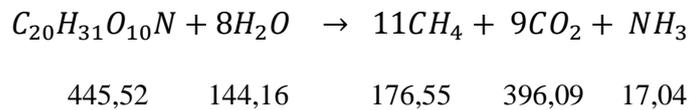
Los datos estimados se visualizan en la tabla 19.

- **Cantidad de gas que se genera de la descomposición de los constituyentes orgánicos en el botadero de la ciudad de Juliaca**

Un depósito de residuos sólidos opera como un reactor bioquímico, donde los elementos esenciales son los desechos y el agua, y las principales emisiones provienen de los gases generados en el depósito y el lixiviado. El volumen de los gases emitidos durante la descomposición anaerobia se calculó utilizando la fórmula generalizada  $C_aH_bO_cN_d$ , asumiendo la conversión completa de los residuos orgánicos biodegradables en  $CO_2$ ,  $CH_4$  y  $NH_3$  (Tchobanoglous et al., 1994).



Para los cálculos se utilizó la siguiente ecuación.



## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. CARACTERIZACIÓN DEL LIXIVIADO Y GASES PROVENIENTES DEL BOTADERO DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS DE JULIACA, UBICADO EN EL DISTRITO DE CABANILLAS, PARCIALIDAD HUANUYO (FUNDO RÚSTICO SAN ANTONIO DE LIPICHINI)

##### 4.1.1. Caracterización del lixiviado

Los análisis químicos del lixiviado del vertedero de Juliaca, ubicado en el distrito de Cabanillas, zona Huanuyo (propiedad rústica San Antonio de Lipichini), indican la presencia de 1,56 mg/L de hierro, superando los límites máximos permitidos por la normativa peruana y otros componentes. Para el tratamiento del lixiviado, se empleó el proceso de aditivos tensioactivos utilizando alquil benceno sulfonato como agente aglomerante, la información se especifica en la tabla siguiente.

**Tabla 13.**

*Caracterización físico-química de los lixiviados de los R.S.U.*

Componente	Muestra sin tratar (mg/L)	Muestra tratada (mg/L)
Hierro	1,56	0,098

Fuente: Laboratorio de Control de Calidad de Aguas de la Facultad de Ingeniería Química de la UNA – Puno

#### 4.1.2. Determinación del tratamiento físico químico mediante el método de aditivos de tensioactivos para tratar los lixiviados y gases generados en el botadero de la ciudad de Juliaca.

La disminución del lixiviado en los desechos sólidos urbanos de Juliaca se realizó mediante el proceso de coagulación y floculación. En este método, se empleó sulfato de aluminio como agente coagulante y un aditivo tensoactivo (alquil benceno sulfonato) como agente floculante.

El propósito último es evaluar las condiciones ideales para realizar el procedimiento de reducción de hierro. Se emplearon variables de operación uniformes en todas las diluciones, cubriendo la cantidad de coagulante (de 50 a 80 mg/L), el tiempo de agitación (30-60 min), y el nivel de pH (de 5 a 10). La velocidad de agitación se mantuvo constante en 150 rpm.

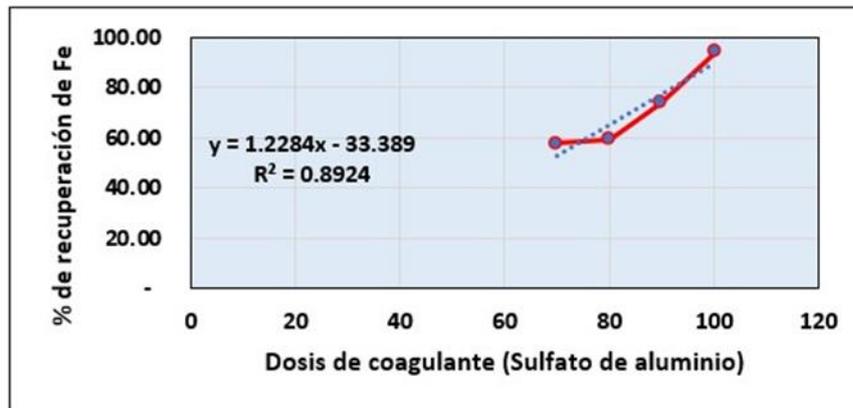
**Tabla 14.**

*Concentración de hierro de la muestra tratada con aditivo tensoactivo (alquil benceno sulfonado) luego del proceso*

Nº de Muestras	Dosis de $Al_2(SO_4)_3$ (mg/L)	Concentración de Fe (mg/L)	Recuperación de Fe (%)
1	50	0,66	57,69
2	60	0,64	58,97
3	70	0,41	73,72
4	80	0,098	93,72

**Figura 13.**

*Eficiencia de recuperación de Fe con coagulante  $Al_2(SO_4)_3$*



El gráfico muestra el % de hierro recuperado después del proceso de coagulación y floculación, utilizando sulfato de aluminio como coagulante y alquil benceno sulfonato como floculante. Se alcanzó una recuperación máxima del 93,72% con una dosis de coagulante de 80 mg/L, lo que equivale a una recuperación de 0,098 mg/L.

#### **4.1.3. Determinación del modelo matemático para el proceso de recuperación de hierro del lixiviado y gases generados por los residuos sólidos del botadero de la ciudad de Juliaca**

##### **- Determinación del modelo matemático**

El software estadístico Statgraphics Centurión XVI, mediante los resultados de experimentación, ha corroborado que el pH de 10 es la característica más relevante en el proceso de adsorción de hierro del lixiviado del vertedero de la ciudad de Juliaca, con un valor de 0,098 mg/L para el coagulante de 80 y un tiempo de 60 minutos. El índice de correlación obtenido fue  $R^2 = 89,24\%$ , y el modelo matemático identificado es:



$$Y = 85,86 - 0,0218889 * \text{Coagulante} - 0,33 * \text{pH} - 0,0978571 * \text{Tiempo}$$

#### 4.1.4. Recuperación de lixiviado

El líquido que se infiltra a través de los desechos sólidos, conocido también como percolado o lixiviado, es aquella sustancia que se filtra a través de los desechos sólidos, disolviendo o transportando materiales suspendidos. En la mayoría de los vertederos y depósitos sanitarios, el lixiviado está constituido por el líquido que entra al depósito desde fuentes externas, principalmente el agua que proviene de la humedad de los desechos, la lluvia y las infiltraciones hacia la celda de disposición.

La cantidad de percolado se ve mayormente afectada por la precipitación pluvial, ya sea a causa de la lluvia directa sobre los desechos depositados o del aumento de la infiltración a través de grietas en el terreno. Para estimar la cantidad generada de lixiviados, se hace uso de la siguiente tabla de producción de aguas percoladas en varias situaciones, elaborada por el Servicio Alemán de Cooperación Social – Técnica (DED).

**Tabla 15.**

*Producción de aguas lixiviados en el botadero*

Tipo de relleno	Producción de aguas lixiviadas (% de la precipitación)	Producción de aguas lixiviadas		
		Precipitación 700 mm/año	Precipitación 1500 mm/año	Precipitación 3000 mm/año
Relleno manual	60	11,51	24,66	49,32
Relleno compactado por maquinaria liviana	40	7,67	16,44	32,88
Relleno compactado por maquinaria pesada	25	4,79	10,27	20,55

Fuente: Servicio Alemán de Cooperación Social – Técnica DED 2011

En el proceso de calcular la cantidad de percolado, se tuvo en cuenta el porcentaje de precipitación pluvial y se fundamentó en un factor de producción expresado en metros cúbicos por año (m<sup>3</sup>/año).

- Precipitación anual en Juliaca: 721 mm (fuente SENAMHI)
- Área anual del relleno :18,9 Ha. = (189 610,54 m<sup>2</sup>)
- Tipo de relleno en la ciudad de Juliaca: Relleno compactado con maquinaria pesada
- Cálculo del lixiviado,

$$721 \times 0,25 = 180,25 \text{ mm}$$

$$180,25 \text{ mm} \times 189 610,54 \text{ m}^2 = 34 177,30 \text{ m}^3/\text{año}$$

- **Cantidad de lixiviado**

En el procedimiento de coagulación-floculación del lixiviado, se establecieron las siguientes situaciones: un período de mezcla de 30 a 60



minutos, una cantidad de coagulante de 50 a 80 mg/L y un pH entre 5 y 10. La velocidad de agitación se mantuvo constante en 150 rpm. Como resultado, se logró la eliminación del 93,72% del hierro.

El tiempo requerido para la formación de flóculos es de 25 minutos al emplear alquil benceno sulfonato como floculante, siendo este proceso dependiente de varias propiedades físico-químicas del percolado, especialmente del nivel de pH.

Los factores más influyentes en el proceso de coagulación-floculación son el pH y el aditivo tensioactivo utilizado como coagulante. Su impacto es crucial, ya que incide en todos los equilibrios de hidrólisis inducidos por la adición de catión metálico.

Se logró un porcentaje de recuperación de hierro del lixiviado de 0,098 mg/L, equivalente al 93,72%, con un pH de 10.

#### - **Cálculos proyectados de la población de la ciudad de Juliaca**

Es esencial prever la cantidad de habitantes que tendrá la ciudad de Juliaca en el futuro, al menos durante los próximos 10 años, con el fin de estimar la cantidad diaria y anual de Residuos Sólidos Municipales (RSM) que necesitará ser gestionada a lo largo de la duración del vertedero sanitario.

Para estimar la evolución de la población, se utilizó un modelo de crecimiento geométrico. En los cálculos, se aplicó una tasa de crecimiento del 0,87% anual, conforme al índice proporcionado por el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI). La siguiente ecuación nos brinda la capacidad de calcular los requisitos para los siguientes 10 años.

$$Pf = Po (1 + r)^n$$

Ec. 1

Dónde:

Pf = Población futura

Po = Población actual

r = Tasa de crecimiento de la población

n = (t final – t inicial) intervalo en años

t = variable tiempo (en años)

- Primer año  $P_1 = 278\ 444$
- Segundo año  $P_2 = 278\ 444 (1 + 0,87)^1 = 280\ 866$

En la tabla 16 se puede observar la suma total de la estimación de la población.

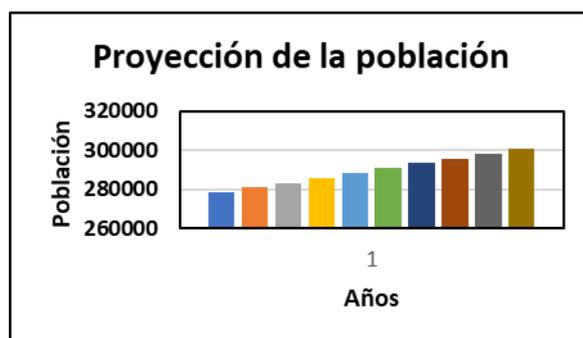
**Tabla 16.**

*Proyección de la población de la ciudad de Juliaca*

Año	Población (hab)
2022	278444
2023	280866
2024	283317
2025	285775
2026	288261
2027	290769
2028	293298
2029	295850
2030	298424
2031	301020

**Figura 14.**

*Proyección de la población de la ciudad de Juliaca*



- **Producción per cápita de los residuos sólidos proyectado (PPC)**

La producción cotidiana de desechos sólidos municipales (ppc) generados en la ciudad de Juliaca, según lo reflejado en la tabla 12, se calcula de la siguiente manera:

$$ppc = \frac{\text{Cantidad de residuos}}{\text{población}} \quad \text{Ec.4}$$

$$ppc_1 = \frac{183\,774,00 \frac{\text{kg}}{\text{día}}}{278\,444 \text{ pobladores}} = 0,660 \text{ kg/hab. día}$$

**Figura 15.**

*Caracterización de residuos sólidos de la ciudad de Juliaca*

COMPONENTES	Domiciliarios	Comercio	Restaurants	Educación	Mercados	Barrido	Hospitales	TOTAL
	RS	RS	RS	RS	RS	Calles	RS	RS
	Ton/día	Ton/día	Ton/día	Ton/día	Ton/día	Ton/día	Ton/día	Ton/día
<b>RESIDUOS INORGÁNICOS</b>								
Vidrio	4,3	5	5	0,64	0,22	0	5	20,16
Latas de hojalata	0,8	0,1	0,8	2,8	0,1	2,8	2,68	10,08
Aluminio	0,48	4,8	0	0	0	0	0	5,28
Metales	1,42	1,84	0	0	0	0,1	0	13,36
Suciedad,	2,1	5	7	4,8	0,48	2,7	0	22,08
Otros	1,03	1,21	0	0	0	0,1	0	1,33
<b>Sub total</b>	<b>9,1</b>	<b>16,74</b>	<b>12,8</b>	<b>8,24</b>	<b>0,8</b>	<b>5,6</b>	<b>7,68</b>	<b>60,96</b>
<b>RESIDUOS ORGANICOS</b>								
Residuos de Comidas	7,4	5	7	4,8	8	14,6	5,34	52,14
Papel	2,64	2,4	2,8	0,2	1	1	1	11,04
Cartón	5	4,02	3,02	2	2,8	2	4,2	23,04
Plásticos	5	7	4,14	2,4	2,4	5	2,38	28,32
Textiles	1,7	1,36	0,68	0	1	0,6	1,46	6,8
Madera	1,2	1,14	0	0	1,64	0,88	0	4,86
Otros	0,1	0,2	0,3	0	1	0	1	2,6
<b>Sub total</b>	<b>22,94</b>	<b>20,92</b>	<b>17,64</b>	<b>9,4</b>	<b>16,84</b>	<b>24,08</b>	<b>14,38</b>	<b>126,2</b>
<b>TOTAL</b>	<b>32,04</b>	<b>37,66</b>	<b>30,44</b>	<b>17,64</b>	<b>17,64</b>	<b>29,68</b>	<b>22,06</b>	<b>183,77</b>

Fuente: Unidad de Gestión de Residuos Sólidos de la Municipalidad Provincial de San Román – Juliaca

- **Proyección de la producción per cápita (ppc) de los residuos sólidos de la ciudad de Juliaca**

$$ppc_1 = 0,660 \text{ kg/día}$$

$$ppc = ppc_1 \times (1,01\%)$$

Ec.5

En la estimación de los desechos por persona para los próximos 10 años, se aplicó la ecuación 5. Se anticipa un aumento del 1% anual en la producción per cápita. Para el segundo y tercer año, esto se traduce en:

$$ppc_2 = ppc_1 + (1 \%) = 0,660 \times (1,01) = 0,6666 \text{ kg/hab/día}$$

$$ppc_3 = 0,6666 + (1 \%) = 0,6666 \times (1,01) = 0,6732 \text{ kg/hab/día}$$

La proyección se observa en la columna 2 de la tabla 13.

La generación por persona al año se calculó al multiplicar la producción cotidiana de desechos sólidos (ppc) por año.

**Tabla 17.**

*Producción per cápita de los residuos sólidos de la ciudad de Juliaca*

Año	Población (hab)	PPC kg/hab-día
	1	2
2022	278 444	0,660
2023	280 866	0,6666
2024	283 317	0,6733
2025	285 775	0,6800
2026	288 261	0,6868
2027	290 769	0,6937
2028	293 298	0,7006
2029	295 850	0,7075
2030	298424	0,7146
2031	301 020	0,7217

- **Generación residuos sólidos municipales (RSM)**

- a) La producción de Residuos Sólidos Municipales (RSM) se llevó a cabo siguiendo los criterios establecidos por el Consejo Nacional del Ambiente (CONAM), según su guía PIGARS, con algunas consideraciones

adaptadas para reflejar las condiciones reales presentadas y reportadas por el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI).

- La población inicial en esta investigación en el 2022 = 278 444
- Producción per cápita de residuos sólidos (PPC) = 0,660 kg
- Cantidad total de RSM

RSM= Población x PPC

RSM = 278 444 hab. x 0,660 kg/hab - día

RSM = 183 773,04 kg/día

La información estimada se visualiza en la tabla 19, en las columnas 3, 4 y 5.

**Tabla 18.**

*Generación de residuos sólidos de la ciudad de Juliaca*

Año	Población (hab)	PPC kg/hab-día	CANTIDAD RESIDUOS SÓLIDOS		
			Diaria kg /día	Anual Ton	Acumulado Ton/año
	1	2	3	4	5
2022	278 444	0,660	183 773,04	67 077,16	67 077,16
2023	280 866	0,6666	187 225,276	68 337,23	135 414,39
2024	283 317	0,6733	190 747,703	69 622,91	205 037,30
2025	285 775	0,6800	194 336,431	70 932,80	275 970,09
2026	288 261	0,6868	197 977,655	72 261,84	348 231,94
2027	290 769	0,6937	201 697,151	73 619,46	421 851,40
2028	293 298	0,7006	205 495,431	75 005,83	496 857,23
2029	295 850	0,7075	209 315,354	76 400,10	573 257,34
2030	298424	0,7146	213 246,33	77 834,91	651 092,25
2031	301 020	0,7217	217 259,981	79 299,89	730 392,14

- **Volumen de los residuos sólidos**

En la tabla 20 se observa el volumen total de los residuos sólidos de la ciudad de Juliaca.

En la columna 3 de la tabla 19 se observa el total de los RS que se depositan en el botadero, donde a partir de la formula podemos determinar el volumen de los residuos sólidos de la ciudad de Juliaca.

La densidad se encontró de acuerdo a la tabla 4,1 del texto manejo completo de desechos sólidos de George Tchobanoglous, edición 1997.

$$v = \frac{m}{\rho}$$

$$v = \frac{183\,773,04 \text{ Kg/día}}{551,87 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 333 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

**Tabla 19.**

*Generación del acumulado del volumen de residuos sólidos de la ciudad de Juliaca*

Año	VOLUMEN RESIDUOS SÓLIDOS					
	Compactados			Botadero		
	Diario m <sup>3</sup>	m.c. m <sup>3</sup> /día	Anual m <sup>3</sup>	m.c. m <sup>3</sup> /año	(DS+ m.c.) Anual (m <sup>3</sup> /año)	Acumulado m <sup>3</sup>
	6	7	8	9	10	11
2022	333,00	66,600	121 545,22	24 309,04	145 854,26	145 854,26
2023	339,26	67,851	123 828,48	24 765,70	148 594,18	294 448,44
2024	345,64	69,128	126 158,17	25 231,63	151 389,81	445 838,25
2025	352,14	70,428	128 531,71	25 706,34	154 238,06	600 076,31
2026	358,74	71,748	130 939,98	26 188,00	157 127,97	757 204,28
2027	365,48	73,096	133 400,00	26 680,00	160 080,00	917 284,28
2028	372,36	74,472	135 912,14	27 182,43	163 094,57	108 0378,85
2029	379,28	75,857	138 438,59	27 687,72	166 126,31	124 6505,16
2030	386,41	77,281	141 038,49	28 207,70	169 246,19	141 5751,34
2031	393,68	78,736	143 693,07	28 738,61	172 431,68	158 8183,02

- **Material de cobertura (m.c.)**

La cantidad de suelo necesaria para cubrir los desechos recién compactados se estima como el 20% del volumen de basura recién comprimida, según se



describe en la ecuación 6 de la columna 7 de la tabla 15, de la siguiente manera:

$$\text{m. c.} = \text{Volumen diario compactado} \times (0,20) \quad \text{Ec.6}$$

$$\text{- Para el primer año } \text{m. c.} = 333 \times 0,20 = 66,6$$

$$\text{- Para el segundo año } \text{m.c.} = 339,26 \times 0,20 = 67,85$$

#### - **Cálculo del área requerida**

Empleando el volumen calculado, se estimó el área necesaria para calcular la cantidad de lixiviado que genera el vertedero de la ciudad de Juliaca. La construcción del relleno sanitario se realizará con una profundidad o altura de 3 metros.

A partir de la ecuación 6 podremos estimar las necesidades de área así

$$A_{RS} = \frac{V_{RS}}{h} \quad \text{Ec. 6}$$

Dónde:

$V_{RS}$  = Volumen de los residuos sólidos

$h$  = Altura o profundidad del relleno sanitario

Se ha utilizado 5 m de altura del relleno sanitario en la ciudad de Juliaca, para encontrar el área.

Se encuentra el área para los próximos 10 años

$$A_{RS} = \frac{145\,854,26}{5} = 29\,178,852$$

Para calcular la extensión completa del vertedero sanitario, se emplea el 30 % del valor del relleno sanitario.

$$A_T = F + A_{RS} \quad \text{Ec. 7}$$

$$F = A_{RS} \times 30\%$$

$F = 145\,854,26 \times 30\% = 43\,756,278$  se sustituye este valor en la ecuación y se obtiene:

Para el primer año:  $A_T = 43\,756,278 + 145\,854,26 = 189\,610,54 \text{ m}^2$

**Tabla 20.**

*Área requerida*

Años	ÁREA REQUERIDA	
	Relleno sanitario $\text{m}^2$	Área total $\text{m}^2$
	12	13
2022	29 170,85	189 610,54
2023	29 718,84	193 172,43
2024	30 277,96	196 806,75
2025	30 847,61	200 509,48
2026	31 425,59	204 266,36
2027	32 016,00	208 104,00
2028	32 618,91	212 022,94
2029	33 225,26	215 964,20
2030	33 849,24	220 020,05
2031	34 486,34	224 161,18

- **Composición química de los residuos sólidos**

Se parte de la composición elemental de los desechos sólidos de Juliaca como punto inicial para deducir la composición química. Esto simplificará la evaluación de las oportunidades de procesamiento y recuperación a través de las fórmulas empíricas que se detallan a continuación.

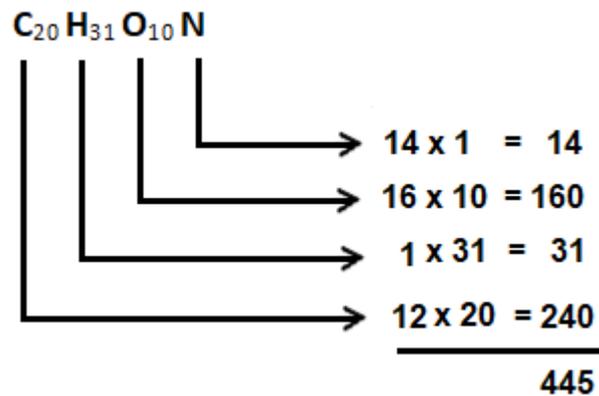
Las expresiones químicas empíricas para realizar estos cálculos se pueden encontrar en la página 24. (Tchobanoglous G. – Theisen H. 1994).

**Fórmulas químicas empíricas del total de residuos sólidos generados**



### Fórmula química sin azufre

Sin agua  $C_{20}H_{31}O_{10}N$  (Para cálculo en base seca)



Se realizan los cálculos utilizando los datos de la tabla 18 de peso seco en kilogramos por día, con el fin de determinar cada componente de los desechos sólidos que se detallan en la tabla 16.

- Para el carbono en los residuos de comida

$$445 \text{ kg} \text{ ----- } 240 \text{ kg de C}$$

$$15,64 \text{ kg} \text{ ----- } X$$

$$X = \frac{15,64 \times 240}{445} = 8,4350 \text{ kg de C}$$

Del mismo modo, se determinan los elementos orgánicos e inorgánicos en kilogramos.

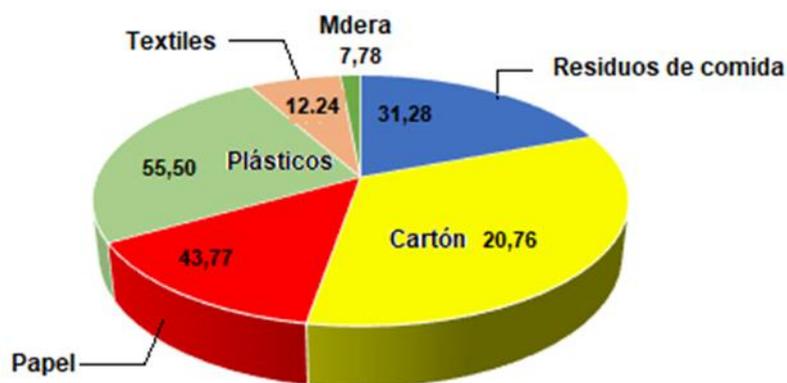
**Tabla 21.**

*Composición química parte orgánica en base seca del botadero de la ciudad de Juliaca*

COMPONENTES	Peso Húmedo Ton/día	Peso Seco Ton/día	Composición kg			
			C	H	O	N
<b>ORGÁNICOS</b>						
Residuos de Comida	52,14	15,64	8,44	1,09	5,62	0,49
Cartón	11,04	10,38	5,60	0,72	3,73	0,33
Papel	23,04	21,89	11,80	1,52	7,87	0,69
Plásticos	28,32	27,75	14,97	1,93	9,98	0,87
Textiles	6,8	6,12	3,30	0,43	2,20	0,19
Madera	4,86	3,89	2,10	0,27	1,40	0,12
<b>total</b>	<b>126,2</b>	<b>85,67</b>	<b>46,21</b>	<b>5,96</b>	<b>30,8</b>	<b>2,69</b>

**Figura 16.**

*Composición química parte orgánica en base seca del botadero de la ciudad de Juliaca*



#### 4.1.5. Cantidad de gas producido en el botadero de la ciudad de Juliaca

##### Volumen de metano, dióxido de carbono y amoníaco producido.

Para calcular la cantidad de gas generada en el vertedero de desechos sólidos en Juliaca, primero se calcula la composición molar de los elementos presentes en la fracción orgánica. Con el objetivo de determinar las fórmulas



químicas excluyendo el azufre, se consulta la tabla 23 y se emplea la siguiente fórmula.

$$n = \frac{m}{P.M.}$$

**Donde:**

n = número de moles

m = masa en g

P.M. = peso molecular

**Tabla 22.**

*Cálculo de la composición molar de los elementos*

	C	H	O	N
g/mol	12,01	1,01	16	14,01
componentes	46,21	5,96	30,8	2,69

Usando los datos de la tabla, procedemos a deducir la fórmula química sin azufre. Posteriormente, llevamos a cabo los cálculos para determinar el volumen de gases producidos en el vertedero de la ciudad de Juliaca, siguiendo el siguiente procedimiento:

1. Tomamos como ejemplo el carbono de la fracción orgánica de la siguiente manera:

$$n = \frac{46,21}{12,01} = 3,84$$

2. Se determina la composición molar de los otros elementos, cuyos cálculos se muestran a continuación.
3. En la siguiente tabla se muestra datos de la fracción orgánica, datos que servirán para calcular la fórmula empírica de los residuos sólidos de la ciudad de Juliaca y la cantidad de gas que generan estos residuos.



Para el carbono tenemos:

$$C = \frac{\text{Peso del carbono } \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}}\right)}{\text{Peso del nitrógeno } \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}}\right)} = \frac{3,84}{0,192} = 20,04$$

Para el hidrógeno tenemos:

$$H = \frac{\text{Peso del hidrógeno } \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}}\right)}{\text{Peso del nitrógeno } \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}}\right)} = \frac{5,90}{0,192} = 30,72$$

Para el oxígeno tenemos:

$$O = \frac{\text{Peso del oxígeno } \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}}\right)}{\text{Peso del nitrógeno } \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}}\right)} = \frac{1,92}{0,192} = 10$$

Para el nitrógeno tenemos:

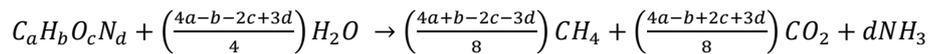
$$N = \frac{\text{Peso del nitrógeno } \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}}\right)}{\text{Peso del nitrógeno } \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}}\right)} = \frac{0,192}{0,192} = 1$$

4. La fórmula química sin azufre es:



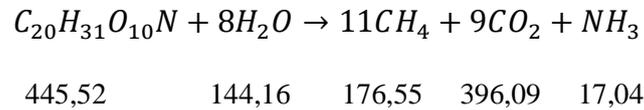
El depósito de desperdicios sólidos opera como un reactor bioquímico, con residuos y agua como ingresos principales, y emite gases del relleno sanitario y lixiviado como principales resultados.

La cantidad de gases liberados durante la descomposición anaerobia se calculó mediante la fórmula generalizada  $C_aH_bO_cN_d$ . Posteriormente, se determinó el volumen total de gas utilizando la siguiente ecuación, suponiendo la conversión completa de los desechos orgánicos biodegradables en  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  y  $\text{NH}_3$ .



## 5. Cálculo de los residuos sólidos

En los cálculos se aplicó la siguiente fórmula.



## 6. Cálculo del volumen de metano, dióxido de carbono y amoniaco producido.

Los gases de metano, dióxido de carbono y amoniaco se calcularon de la siguiente manera:

Los pesos específicos son: (Tchobanoglous *et al.*, 1994).

$$CH_4 = 0,717 \text{ kg/m}^3$$

$$CO_2 = 1,977 \text{ kg/m}^3$$

$$NH_3 = 0,771 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{FÓRMULA GAS} = \frac{\text{Peso de GAS} \times \text{Peso seco R. S.}}{\text{Peso CHON} \times \text{Peso específico}}$$

$$\text{Metano} = \frac{(176,55 \text{ g})(85670 \text{ kg})}{(445,52 \text{ kg kg})(0,717 \text{ kg/m}^3)} = 47\ 348,93 \text{ m}^3$$

$$\text{Dióxido de carbono} = \frac{(396,09 \text{ kg})(85670 \text{ kg})}{(445,52 \text{ kg kg})(1,978 \text{ kg/m}^3)} = 38\ 506,07 \text{ m}^3$$

$$\text{Amoniaco} = \frac{(17,04 \text{ kg})(85670 \text{ kg})}{(445,52 \text{ kg kg})(0,771 \text{ kg/m}^3)} = 4\ 249,88 \text{ m}^3$$

**Volumen total de gas producido = 90 104,88 m<sup>3</sup>**

## 4.2. DISCUSIÓN

En el estudio de Aliaga (2010), al emplear el método Fenton, se observó una reducción de la sustancia orgánica, alcanzando un pH óptimo de 4. Este fenómeno se atribuye a la disminución de la materia orgánica en el tratamiento, donde las dos concentraciones de peróxido de hidrógeno resultaron en una reducción de la materia orgánica. A medida que el pH crecía a 5 con dosis elevadas de peróxido, la materia orgánica se volvía menos evidente. Para lograr una mayor reducción de la sustancia orgánica, se llevó a cabo el método de Coagulación – Floculación empleando cloruro férrico como agente coagulante. Ambos procedimientos de Coagulación - Floculación alcanzaron una reducción de aproximadamente el 55% de los sólidos en suspensión en la muestra de agua, demostrando la eficacia de ambos coagulantes en disminuir este parámetro.

En nuestra investigación, la etapa de coagulación-floculación se ejecutó empleando sulfato de aluminio como coagulante, resultando en una recuperación de 0,098 mg/L, equivalente al 93,72%.

Siguiendo la metodología de Teca *et al.* (2013), se aplicó el método de coagulación/floculación para la eliminación de DQO y partículas en suspensión mediante la incorporación de agentes coagulantes. Este enfoque demostró ser eficaz en la reducción de DQO, pero menos efectivo en la eliminación total de sólidos en suspensión. Las dosis óptimas fueron 100 partes por millón (ppm) de polímero aniónico de poliacrilamida como agente floculante y entre 200 y 450 ppm de  $Fe_2(SO_4)_3$  como coagulante, logrando una remoción del 55,48% para la turbidez.

En nuestra investigación, seleccionamos el método de coagulación utilizando sulfato de aluminio y alquil benceno sulfonato como sustancia floculante. La velocidad



de agitación se ajustó a 150 revoluciones por minuto, se mantuvo durante 60 minutos a un nivel de pH de 10 con una concentración de 60 mg/L. Este enfoque resultó en una destacada recuperación del 93,72%.

Conforme a la investigación de Pellón y colaboradores (2009), se detectó un elevado nivel de sustancias orgánicas expresado en DQO y DBO5, con una presencia notable de coliformes fecales, estimados entre  $10^4$  y  $10^5$  npm/00mL. El balance hídrico reveló un volumen de lixiviado de 42 m<sup>3</sup>/día durante las lluvias y 13 m<sup>3</sup>/día en época seca. Se implementó una tecnología específica que comprendía un tanque séptico, un filtro anaerobio y un sistema de lagunas. Este enfoque condujo a una notable reducción de los contaminantes, expresados en términos de DQO y DBO5, disminuyendo de 2011 a 75 mg/L y de 902 a 30 mg/L, respectivamente.

En este estudio, la determinación de las cantidades de DQO y DBO5 no tuvo un papel crucial. Sin embargo, se destacó la importancia de calcular la cantidad de gas generado en el vertedero de Juliaca, alcanzando un total de 90,104.88 m<sup>3</sup>. Se subraya la relevancia de implementar un proceso de recuperación de estos gases, con un enfoque especial en el metano, para la generación de diversas formas de energía.



## V. CONCLUSIONES

- En el vertedero de Juliaca, situado en el distrito de Cabanillas, parcialidad Huanuyo (fundo rústico San Antonio de Lipichini), se llevó a cabo la recuperación de hierro en el lixiviado mediante el proceso de coagulación-floculación. En este proceso, se empleó sulfato de aluminio como coagulante y alquil benceno sulfonato como floculante, logrando resultados satisfactorios en la recuperación del hierro.
- El proceso evidenció que el pH es la variable más relevante en la coagulación-floculación. En la caracterización de los lixiviados, se identificó la presencia de hierro con una concentración de 0,098 mg/L.
- La utilidad clave del sulfato de aluminio como coagulante resultó fundamental, destacando como el agente precipitante más eficaz para lograr una recuperación óptima de hierro. Además, se identificó que el alquil benceno sulfonato desempeñó el papel más destacado como agente precipitante. Se subraya la importancia de mantener un movimiento continuo y/o agitación durante el proceso para asegurar una suspensión homogénea.
- La concentración máxima de hierro alcanzó los 1,56 mg/L en el lixiviado del vertedero de residuos sólidos de la ciudad de Juliaca. Este lixiviado fue sometido a tratamiento mediante el método de coagulación y floculación. Para llevar a cabo este proceso, se emplearon las siguientes proporciones: 50-80 mg/L de coagulante (sulfato de aluminio), un tiempo de tratamiento de 30-60 minutos, un rango de pH de 5-10, y una velocidad de agitación de 150 rpm.
- El procedimiento ha posibilitado una recuperación del 93,72%, equivalente a 0,098 mg/L de hierro, mediante el tratamiento con alquil benceno sulfonato.



- El modelo matemático indica que la fórmula de regresión elaborada representa los datos experimentales originales y describe de manera precisa el sistema analizado. El coeficiente de correlación obtenido para esta ecuación es del 89,24%.
- El respaldo del modelo matemático se sustenta en los valores identificados y los resultados experimentales. Por lo tanto, se llega a la conclusión de que el nivel de pH es el factor más determinante en el procedimiento de recuperación de hierro. La ecuación matemática resultante es la siguiente:  **$Y = 85,86 - 0,0218889 * \text{Coagulante} - 0,33 * \text{pH} - 0,0978571 * \text{Tiempo}$**
- En el transcurso de la recuperación del hierro mediante el procedimiento de aglomeración y agrupación, se determinaron criterios físico-químicos clave. Se logró una velocidad de agitación idónea de 150 revoluciones por minuto, un lapso de tratamiento de 60 minutos a un pH de 10, utilizando 60 mg/L de sulfato de aluminio como coagulante.
- Se ha cuantificado la emisión de gases generados por el vertedero de la ciudad de Juliaca, con las siguientes cantidades: metano (CH<sub>4</sub>) 47,348.93 m<sup>3</sup>, dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) 38,506.07 m<sup>3</sup> y amoníaco (NH<sub>3</sub>) 4,249.88 m<sup>3</sup>, sumando un total de 90,104.88 m<sup>3</sup> en conjunto.



## VI. RECOMENDACIONES

- Es fundamental que la Municipalidad de Juliaca lleve a cabo estudios más exhaustivos sobre el tratamiento de lixiviados, considerando opciones como postratamientos biológicos o procesos de oxidación avanzada. Además, se recomienda realizar estudios de toxicidad para evaluar la degradación concluida de la sustancia orgánica presente en el líquido tratado.
- Se sugiere también que la Municipalidad de Juliaca realice investigaciones para la recuperación de los gases producidos en el vertedero.
- En cuanto a la estructura del lixiviado, se sugiere llevar a cabo un análisis más minucioso. Dada la presencia de otros componentes como metales adicionales, materia orgánica y diversos ácidos, es esencial llevar a cabo un análisis más completo. Esto se debe a que los niveles de estos componentes pueden ser significativos y necesitan una evaluación detallada.
- Es vital promover la ejecución de un vertedero controlado en la localidad de Juliaca. Dentro de sus instalaciones, se debería procesar el líquido percolado mediante distintos métodos con el fin de prevenir la contaminación ambiental.
- La Universidad Nacional del Altiplano como entidad académica y la Facultad de Ingeniería Química deben continuar impulsando la elaboración de proyectos de tesis e indagaciones acerca del tratamiento de líquidos percolados en los variados vertederos del Departamento de Puno.



## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aliaga. (2010). Aplicación del proceso Fenton y coagulación - floculación para la regeneración de aguas depuradas. (*Tesis de pregrado*). Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial-Zaragoza, España.
- Bautista P.; Mohedano A.F.; Gilarranz M.A.; Casas J.A.; Rodríguez J.J.(2007) “Application of Fenton oxidation to cosmetic wastewaters treatment”. Journal of Hazardous Materials
- Cárdenas, Yolanda 2000 SEDAPAL. Evaluación de Platas y Desarrollo tecnológico. [Consultado el 31 de agosto del 2011
- Collazos, Héctor (2008). Diseño y operación de rellenos sanitarios. Tercera edición. Colombia. Escuela Colombiana de Ingeniería. 240 p. ISBN: 978-958-8060-73-6.
- Corena M. (2008). Sistemas de tratamientos de lixiviados generados en rellenos sanitarios. (*Tesis de pregrado*). Universidad de Sucre, Bolivia.
- Corbitt, Robert A. (2003). Manual de referencia de la ingeniería ambiental. España. McGraw Hill. 1037 p. ISBN: 84-481-3596-2.
- Cuchimaque C. Vargas L. Rios C. (2013). ). Remoción de Fe y Mn en aguas naturales por adsorción-oxidación sobre clinoptilolita. (*Tesis de pregrado*). Universidad de Antioquia, Antioquia.
- Dianderas Juvenal. (2011). Biolixiviación o Lixiviación Bacteriana. (*Tesis de Maestro*). Universidad Nacional Santiago de Chile, Chile.
- Eckenfelder W., (1989), Industrial Water Pollution Control, Segunda edición, Ed. McGraw Hill, Estados Unidos, p. 302-304.



- Ehrigh, H. (1992). Cantidad y contenido de lixiviados de desechos domésticos. Proyecto CEPIS/GTZ.
- Garay, J., Panizzo, L., Lesmes, L., Ramirez, G., & Sanchez, J. (1993). Manual de Técnicas Analíticas de Criterios Físico-Químicos y Contaminantes Marinos. 3ª ed. Cartagena: Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas.
- García, J., Ferrer, C. y Albarran, F. (2008). Tratamiento de lixiviados de vertedero de RSU por procesos de membranas. I Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos Castellon, 23 - 24 de julio de 2008.
- García López Juan. (2012). Caracterización y tratamiento de los lixiviados generados en un centro de tratamiento de residuos urbanos como criterio de calidad en el material Bioestabilizado. (*Tesis de pregrado*). Universidad de Burgos, España.
- Henry, J.G. y Heinke, G. W. (1999). Tratamiento y eliminación de lixiviados. Ingeniería Ambiental, México DF: PRENTICE HALL.
- Irwin Thomas. 2008. Floculadores, fundamentos “Engineer’s Guide to Water and Wastewater,” Philadelphia Mixers.  
<http://www.engineeringfundamentals.net/Floculadores/fundamentos.htm>
- Jiang W., Zhang W., Li B., Duan J., LV Y., Liu W. y Ying W., (2011), Combined Fenton oxidation and biological activated carbon process for recycling of coking plant effluent, Journal of Hazardous Materials, Vol. 189, p. 308-314.
- Pellón Alexis Arrechea, M. L. (2009). Tecnología para el tratamiento de lixiviados provenientes de vertederos de residuos sólidos. *Trabajo de investigación*. Universidad de Oriente, Cuba.
- Méndez Novelo R. I, Pietro Giovanna Bronca J. A., Santos Ocampo B., Sauri Riancho M. R., Giacomán Vallejos G. y Castillo Borges, René (2009) “determinación



de la dosis óptima de reactivo Fenton en un tratamiento de lixiviados por Fenton–adsorción “Universidad Autónoma de Yucatán, Facultad de Ingeniería. Av. Industrias No Contaminantes por Periférico Norte, s/n. Tablaje Catastral 12685. Mérida, Yucatán, México.

Pellón A. López Torres M. Espino Lloéns M. (2009). Tecnología para el tratamiento de lixiviados provenientes de vertederos de residuos sólidos urbanos. *Revista CENIC*. Trabajo de investigación, Cuba.

Qarani S., Abdul H., Suffiani M., Bashir M. y Umar M., (2010), Leachate characterization in semi-aerobic and anaerobic sanitary landfills: A comparative study, *Journal of Environmental Management*.

Química Superior Ambiental (2011)-UCE-FIGENMPA-Escuela de Ingeniería Ambiental.

Renous, Givaudan J., Poulain S., Dirassouyan F. y Moulin P., (2008), Landfill leachate treatment: Review and opportunity, *Journal of hazardous materials*, Vol. 150, p. 468-493.

Ritcher y Cánepa. (1992) Manual Diseño, criterios para el diseño de Floculadores y sedimentadores. CEPIS, Perú. Libro publicado en la página del CEPIS. Brasil.

Sánchez S. Jorge de C. E., Rodríguez G., Ferreira G. F., Román S., POLO A., (2004), Gestión Integral de Residuos Urbanos en el Municipio de Selva-Santiago del Estero. Instituto de Ciencias Químicas, Área de comunicación-Facultad de Agronomía y Agroindustrias. Universidad Nacional de Santiago del Estero. Industria Argentina. Estero-Argentina.

Sun-Kou María del Rosario; Daniel Obregón Valencia; Ángela Pinedo Flores; Ana Lucía Paredes Doig; Javier Aylas Orejón, (2014), Adsorción de metales



pesados empleando carbones activados preparados a partir de semillas de Aguaje.

Teca Gavilanes, Diego E. (2013) “Estudio de selección de aditivos tensioactivos para el tratamiento de lixiviados generados en el relleno sanitario del Cantón Antonio Ante, Provincia de Imbabura” Quito-Ecuador.

Tchobanoglous George, et. al. (1995). Gestión integral de residuos sólidos. España. McGraw-Hill. 1107 p. ISBN: 0-07-063237-5.

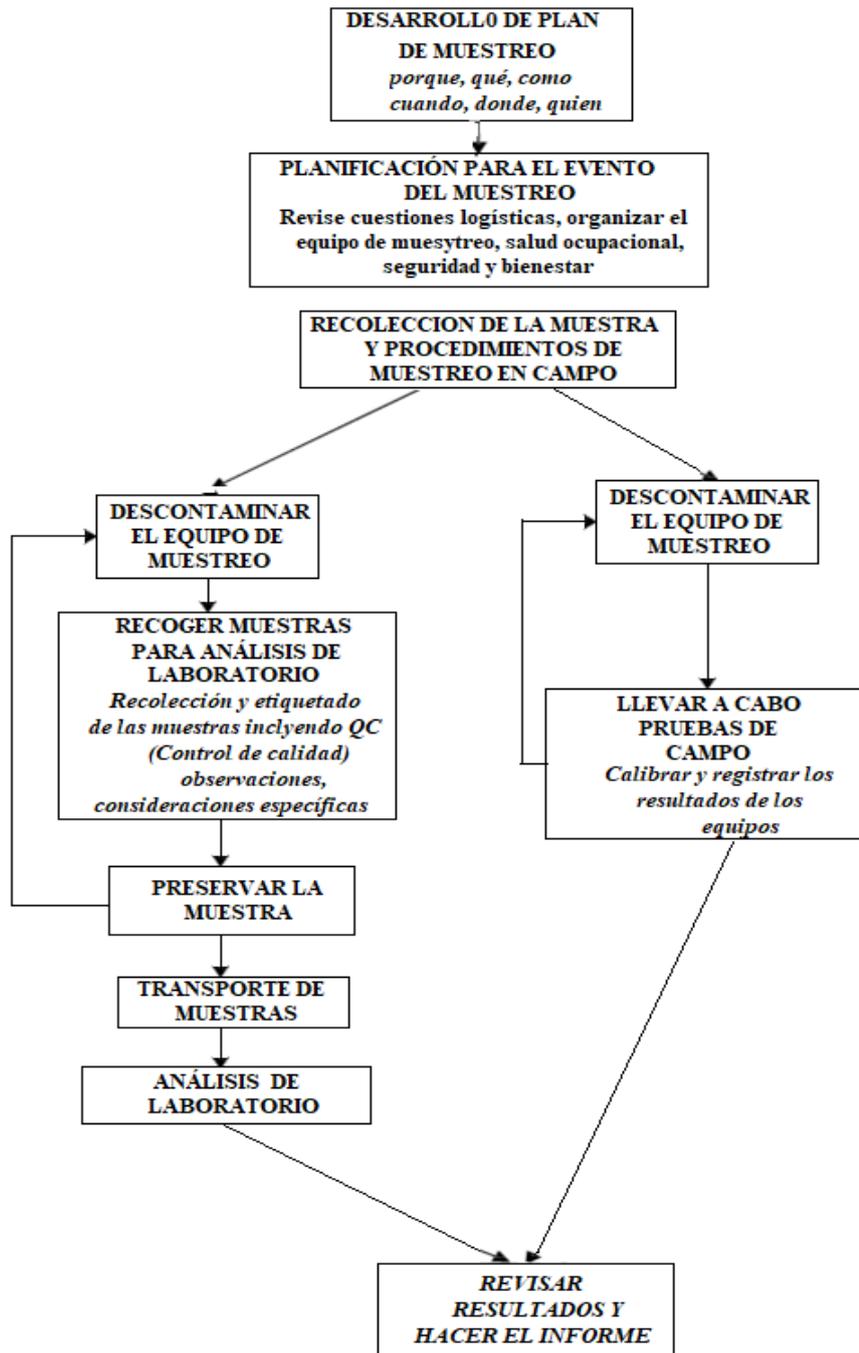
Zapata, M. A. & Zapata, S. C. (2013). Un método de gestión ambiental para evaluar rellenos sanitarios. Revista Gestión y Ambiente pág. 105 -120. Medellín.

Yáñez Fernando (2007) Grandinvest Art. Clarificación DAF Tratamiento químico grupo andino de inversiones SAC.



## ANEXOS

## ANEXO 1: Protocolo para la toma de muestras de lixiviados



## ANEXO 2. Evidencias fotográficas

Figuras de la toma de muestras de lixiviados del botadero de RSU -juliaca *Huanuyo*  
(*fundo rústico san antonio lipichini*)

### Figura 17.

*Poza de lixiviación*



### Figura 18.

*En la poza de lixiviación, Interior de la poza de lixiviación*



**Figura 19.**

*Toma de muestras en la poza de lixiviado*



**Figura 20.**

*Lixiviado derramándose, Lixiviado recogido*



**Figura 21.**

*Toma de muestras en la poza de lixiviado*



**Figura 22.**

*Preparando las muestras para determinar el pH*



**Figura 23.**

*Determinando el pH de las muestras a trabajar*



**Figura 24.**

*Pesando diferentes cantidades de sulfato de aluminio*



**Figura 25.**

*Preparando las muestras con sulfato de aluminio como coagulante*



**Figura 26.**

*Proceso de coagulación-floculación del lixiviado con sulfato de aluminio y Tensioactivo.*



**Figura 27.**

*Proceso de filtración de cada muestra del proceso de adsorción de Fe*



**Figura 28.**

*Proceso de filtración del lixiviado coagulado y floculado*



**Figura 29.**

*Muestras listas para ser llevados a su análisis final*





**ANEXO 3: Memorando**



Universidad Nacional del Altiplano - Puno

Facultad de Ingeniería Química



**MEMORANDO. N° 132-2022- FIQ-UNA-P.**

PARA : **Ing. Mg. Higinio Alberto Zúñiga Sánchez**  
Coordinador del laboratorio de Control de Calidad

ASUNTO : Brindar facilidades

FECHA : Puno, C.U. 12 de diciembre de 2022

Por intermedio del presente, comunico a usted, que en atención a la solicitud presentada por el egresado de la Facultad de Ingeniería Química, **SERGIO TICONA VELARDE.**

Solicito a usted, brindarle las facilidades del caso, en el uso de las instalaciones del Laboratorio de Control de Calidad, para realizar que la interesada pueda ejecutar su proyecto de Tesis "Tratamiento de lixiviados y gases de los residuos sólidos del botadero de la ciudad de Juliaca, mediante el procesos de aditivos tensioactivos"

Atentamente,



**WALTHER B. APARECIO ARAGON, Ph.D**  
DECANO FIQ-UNA

Ing. Luz Maci MP  
PTC u Ser  
@

C.c  
Interesado  
Archivo 22  
WBAA/rva



## ANEXO 4: Solicitud para tomar muestras de los lixiviados

“Año De La Unidad, La Paz Y El Desarrollo”

Solicito: Tomar muestras de los lixiviados de los residuos sólidos en las celdas de transición de HUANUYO

SEÑOR GERENTE DE LA UNIDAD DE RESIDUOS SOLIDOS –RRSS DE LA MUNICIPALIDAD PROVINCIAL DE SAN ROMAN – JULIACA

ING: ARTURO OROZ BOCANGEL - JEFE DE LA UNIDAD DE RRSS

Yo Sergio Ticona Velarde, identificado con DNI N°44260896, Bachiller de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Altiplano, con domiciliado en el Jr. Progreso N° 1037 de la ciudad de Juliaca, ante Ud. con el debido respeto me presento y expongo:

Que, soy Bachiller de la escuela profesional de Ingeniería Química y vengo realizando mi TESIS para obtener el Título Profesional de INGENIERO QUÍMICO, por lo cual requiero Tomar MUESTRAS de los lixiviados de los residuos sólidos en las celdas de transición de HUANUYO, por lo cual solicito a su autoridad me permita hacer LA TOMA DE MUESTRAS y así poder continuar con mi proyecto de tesis.

Por lo expuesto ruego a usted acceder a mi solicitud y desde ya agradecer su comprensión y apoyo en la ejecución de mi proyecto de tesis.

Juliaca, 21 de agosto del 2023



  
-----  
Sergio Ticona Velarde  
DNI N° 44260896



## ANEXO 5: Informe de residuos solidos



MUNICIPALIDAD PROVINCIAL  
DE SAN ROMÁN

UNIDAD DE GESTIÓN DE  
RESIDUOS SÓLIDOS



“AÑO DE LA UNIDAD, LA PAZ Y EL DESARROLLO”

**INFORME N° 004-2023/CAESA/LAB/FRFC**

**A** : Ing. Arturo Oroz Bocangel  
**JEFE DE UNIDAD DE GESTION DE RESIDUOS SOLIDOS.**

**De** : Ing. Fred Ruben Flores Calli.  
**ESPECIALISTA DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE LIXIVIADO.**

**Asunto** : **COMPOSICION FISICA DE LOS RESIDUOS SOLIDOS**

**Fecha** : **23 DE JULIO DEL 2023.**

Es grato dirigirme a Ud. jefe de la Unidad de Residuos Sólidos, con la finalidad de hacer conocimiento sobre la composición física de los residuos sólidos que se generan en la ciudad de Juliaca, para ello se tomo en cuenta los siguientes:

**PRIMERO.** – Se separó los componentes de los camiones recolectores – compactadoras, del último horario según el cronograma establecido en la unidad.

**SEGUNDO.** - De acuerdo a la composición física que se pudo caracterizar, son residuos compostificables; el 30.66 % son comerciales reciclables inorgánicos; el 3.68 % son reciclables inorgánicos no comerciales, el 4.15 % son residuos no reciclables; el 7.93 % son residuos domésticos peligrosos; el 3.91% son residuos domésticos inertes y 0.23 % otros.

**TERCERO.** – Para tener en cuenta una mejor caracterización se tomó en consideración una visión panorámica de acuerdo a las toneladas /día de los residuos sólidos que a continuación se muestra en el siguiente cuadro N.º 01.

COMPONENTES	Domiciliarios	Comercio	Restaurants	Educación	Mercados	Barrido	Hospitales	TOTAL
	RS	RS	RS	RS	RS	Calles	RS	RS
	Ton/día	Ton/día	Ton/día	Ton/día	Ton/día	Ton/día	Ton/día	Ton/día
<b>RESIDUOS INORGANICOS</b>								
Vidrio	4,3	5	5	0,64	0,22	0	5	20,16
Latas de hojalata	0,8	0,1	0,8	2,8	0,1	2,8	2,68	10,08
Aluminio	0,48	4,8	0	0	0	0	0	5,28
Metales	1,42	1,84	0	0	0	0,1	0	13,36
Suciedad,	2,1	5	7	4,8	0,48	2,7	0	22,08
Otros	1,03	1,21	0	0	0	0,1	0	1,33
Sub total	9,1	16,74	12,8	8,24	0,8	5,6	7,68	60,96

MUNICIPALIDAD PROVINCIAL DE SAN ROMAN  
Jr. JAUREGUI N° 321



UNIDAD DE GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS  
SALON CONSISTORIAL

MUNICIPALIDAD PROVINCIAL DE SAN ROMÁN - JULIACA  
UNIDAD DE RESIDUOS SÓLIDOS  
Ing. Fred Ruben Flores Calli  
CJP. 212613



MUNICIPALIDAD PROVINCIAL  
DE SAN ROMÁN

UNIDAD DE GESTIÓN DE  
RESIDUOS SÓLIDOS



RESIDUOS ORGANICOS								
Residuos de Comidas	7,4	5	7	4,8	8	14,6	5,34	52,14
Papel	2,64	2,4	2,8	0,2	1	1	1	11,04
Cartón	5	4,02	3,02	2	2,8	2	4,2	23,04
Plásticos	5	7	4,14	2,4	2,4	5	2,38	28,32
Textiles	1,7	1,36	0,68	0	1	0,6	1,46	6,8
Madera	1,2	1,14	0	0	1,64	0,88	0	4,86
Otros	0,1	0,2	0,3	0	1	0	1	2,6
<b>Sub total</b>	<b>22,94</b>	<b>20,92</b>	<b>17,64</b>	<b>9,4</b>	<b>16,84</b>	<b>24,08</b>	<b>14,38</b>	<b>126,2</b>
<b>TOTAL</b>	<b>32,04</b>	<b>37,66</b>	<b>30,44</b>	<b>17,64</b>	<b>17,64</b>	<b>29,68</b>	<b>22,06</b>	<b>183,77</b>

Es cuanto puedo informar y poner de su conocimiento para los fines pertinentes. Sin otro en particular hago propicia la ocasión para reiterarle las expresiones de mi estima personal y mi más alta consideración.

Atentamente,



MUNICIPALIDAD PROVINCIAL DE SAN ROMÁN - JULIACA  
UNIDAD DE GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS

  
Ing. Fred Rubén Flores Calli  
CIP. 212613



## ANEXO 6: Certificado de análisis



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**  
**LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD**



---

FIQ Nro **LQ-2023**

Certificado de Análisis

Nº 002384

---

**ASUNTO** : Análisis de HIERRO DE AGUA LIXIVIADO

**PROCEDENCIA** : BOTADERO DE RESIDUOS SÓLIDOS DE JULIACA  
**PROYECTO** : TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS Y GASES DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS DEL BOTADERO DE LA CIUDAD DE JULIACA MEDIANTE EL PROCESO DE ADITIVOS TENSIÓACTIVOS

**INTERESADO** : SERGIO TICONA VELARDE  
**MOTIVO** : ANÁLISIS DE AGUA RESIDUAL  
**MUESTREO** : 27/09/2023, por el interesado  
**ANÁLISIS** : 27/09/2023  
**COD. MUESTRA** : B009-000516

---

**DETERMINACION DE HIERRO**

MUESTRA Y/O CLAVE DE IDENTIFICACION	Hierro (ppm)	pH
Muestra 01	0.66	4.65
Muestra 02	0.64	6.23
Muestra 03	0.41	9.25
Muestra 04	0.098	10.27
Muestra 05 (agua lixiviada)	1.56	6.20

Puno, C.U. 18 de octubre del 2023.  
VºBº



ING. LUZ MARINA TEVES PONCE  
INGENIERO LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD  
FIG-UNIA-CIP-18290



Walter B. Apaza Murocho  
DECANO - FIG - UNIA

---

Ciudad Universitaria Av. Floral N° 1153, Facultad de Ingeniería Química - Cel.: 951756420



## ANEXO 7: Declaración jurada de autenticidad de tesis



Universidad Nacional  
del Altiplano Puno



Vicerrectorado  
de Investigación



Repositorio  
Institucional

### DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo SERGIO TICONA VELARDE  
identificado con DNI 44260896 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional,  Programa de Segunda Especialidad,  Programa de Maestría o Doctorado

INGENIERIA QUIMICA

informo que he elaborado el/la  Tesis o  Trabajo de Investigación denominada:

" TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS Y GASES DE LOS RESIDUOS  
SOLIDOS DEL BOTADERO DE LA CIUDAD DE JULIACA  
MEDIANTE EL PROCESO DE ADITIVOS TENSIÓACTIVOS "

Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno 27 de DICIEMBRE del 2023



FIRMA (obligatoria)



Huella



## ANEXO 8: Autorización para el depósito de tesis o trabajo de investigación en el repositorio institucional



Universidad Nacional  
del Altiplano Puno



Vicerrectorado  
de Investigación



Repositorio  
Institucional

### AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo SERGIO TICONA VELARDE  
identificado con DNI 41260896 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional,  Programa de Segunda Especialidad,  Programa de Maestría o Doctorado

INGENIERIA QUIMICA

informo que he elaborado el/la  Tesis o  Trabajo de Investigación denominada:

" TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS Y BASES DE LOS RESIDUOS  
SOLIDOS DEL BOTADERO DE LA CIUDAD DE JULIACA  
MEDIANTE EL PROCESO DE ADITIVOS TENSIODACTIVOS. "

para la obtención de  Grado,  Título Profesional o  Segunda Especialidad.

Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los "Contenidos") que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 27 de DICIEMBRE del 2023

  
FIRMA (obligatoria)



Huella