



UNAP



**FACULTAD DE AGRONOMÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE AGRONOMÍA**

TESIS

**“DOSIFICACIÓN DE POLICLORURO DE ALUMINIO EN LA
SEDIMENTACIÓN DE LODO CONTAMINADO CON
HIDROCARBUROS, EN SUELOS DE AGUAJAL, DEL
OLEODUCTO CORRIENTES-SARAMURO.
LORETO, 2021”**

**PARA OPTAR TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO AGRÓNOMO**

**PRESENTADO POR:
DANILO JOEL TELLO SIAS**

**ASESOR:
Ing. JULIO PINEDO JIMENEZ, Dr.**

**IQUITOS, PERÚ
2024**



UNAP

**FACULTAD DE AGRONOMÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE AGRONOMÍA**



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS No. 009-CGYT-FA-UNAP-2024.

En Iquitos, en el auditorio de la Facultad de Agronomía, a los 05 días del mes de febrero del 2024, a horas 06:00pm., se dio inicio a la sustentación pública de la Tesis titulada: **"DOSIFICACIÓN DE POLICLORURO DE ALUMINIO EN LA SEDIMENTACIÓN DE LODO CONTAMINADO CON HIDROCARBUROS, EN SUELOS DE AGUAJAL, DEL OLEODUCTO CORRIENTES-SARAMURO. LORETO, 2021"**, aprobado con Resolución Decanal No. 004-CGYT-FA-UNAP-2021, presentado por el Bachiller: **DANILO JOEL TELLO SIAS**, para optar el Título Profesional de **INGENIERO AGRÓNOMO**, que otorga la Universidad de acuerdo a la Ley y Estatuto.

El Jurado Calificador y dictaminador designado mediante Resolución Decanal **No. 081-CGYT-FA-UNAP-2023**, está integrado por:

- | | |
|---|-------------------|
| Ing. JULIO ABEL MANRIQUE DEL AGUILA, Dr. | PRESIDENTE |
| Ing. RONALD YALTA VEGA, M.Sc. | MIEMBRO |
| Ing. MANUEL CALIXTO AVILA FUCOS, M.Sc. | MIEMBRO |

Luego de haber escuchado con atención y formulado las preguntas necesarias, las cuales fueron respondidas:

..... *A Satisfacción*

El jurado después de las deliberaciones correspondientes, llegó a las siguientes conclusiones:

La sustentación pública y la Tesis han sido: *Aprobado* con la calificación *Muy Buena*

Estando el Bachiller *Apto* para obtener el Título Profesional de *Ingeniero Agrónomo.*

Siendo las *7:30 pm*, se dio por terminado el acto **ACADÉMICO**.

[Signature]
Ing. JULIO ABEL MANRIQUE DEL AGUILA, Dr.
Presidente

[Signature]
Ing. RONALD YALTA VEGA, M.Sc.
Miembro

[Signature]
Ing. MANUEL CALIXTO AVILA FUCOS, M.Sc.
Miembro

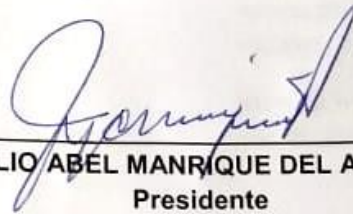
[Signature]
Ing. JULIO PINEDO JIMENEZ, Dr.
Asesor

JURADO Y ASESOR

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA AMAZONIA PERUANA
FACULTAD DE AGRONOMÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE AGRONOMÍA**

Tesis aprobada en sustentación pública el 05 de febrero del 2024, por el jurado Ad-Hoc nombrado por el Comité de Grados y Títulos de la Facultad de Agronomía, para optar el título profesional de:

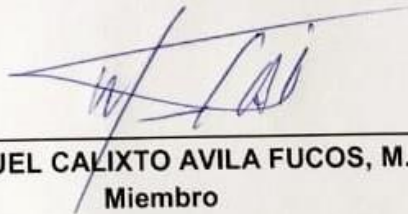
INGENIERO AGRÓNOMO



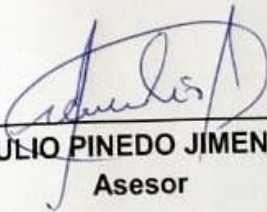
**Ing. JULIO ABEL MANRIQUE DEL AGUILA, Dr.
Presidente**



**Ing. RONALD YALTA VEGA, M.Sc.
Miembro**



**Ing. MANUEL CALIXTO AVILA FUCOS, M.Sc.
Miembro**



**Ing. JULIO PINEDO JIMENEZ, Dr.
Asesor**



**Ing. FIDEL ASPAÑO VARELA, Dr.
Decano**



RESULTADO DEL INFORME DE SIMILITUD

Reporte de similitud

NOMBRE DEL TRABAJO

FA_TESIS_TELLO SIAS(2da rev).pdf

RECuento DE PALABRAS

7305 Words

RECuento DE CARACTERES

37581 Characters

RECuento DE PÁGINAS

34 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

134.9KB

FECHA DE ENTREGA

Jan 18, 2024 9:29 PM GMT-5

FECHA DEL INFORME

Jan 18, 2024 9:29 PM GMT-5

● 21% de similitud general

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

- 21% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 10% 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
- Coincidencia baja (menos de 10 palabras)

Resumen

DEDICATORIA

A mis padres **Dora Sias de Tello** y **Walter Tello Mesías**, por su amor, paciencia, comprensión, esfuerzo, a pesar de no contar con estudios superior inculcaron en mí las ganas de superación y el esforzarme cada día más.

A mi hijo **Marcelz Anthuan Tello Arimuya**, por ser el motivo y razón para seguir adelante.

AGRADECIMIENTO

A Dios, por darme la vida y la salud, que me permitió la realización de esta tesis.

A la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana, a todos los docentes de la Facultad de Agronomía que se esmeraron para que cada día salgan mejores profesionales.

Al Ing. Nelson Cevallos, por brindarme el conocimiento necesario para el inicio de la creación de esta tesis.

Al Ing. Walter Cubas, por el apoyo brindado durante mi formación profesional.

A mi familia, por el apoyo emocional y por su perseverancia para el término de esta tesis.

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Pág.
PORTADA	i
ACTA DE SUSTENTACIÓN	ii
JURADO Y ASESOR.....	iii
RESULTADO DEL INFORME DE SIMILITUD	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
ÍNDICE DE CONTENIDO	vii
ÍNDICE DE CUADROS.....	ix
ÍNDICE DE GRÁFICOS	x
RESUMEN.....	xi
ABSTRACT	xii
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO	2
1.1. Antecedentes.....	2
1.2. Bases teóricas	4
1.3. Definición de términos básicos	10
CAPITULO II: HIPÓTESIS Y VARIABLES	12
2.1. Formulación de la hipótesis	12
2.2. Variables y su operacionalización.....	12
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA	14
3.1. Tipo y diseño de investigación.....	14
3.1.1. Tipo de investigación.....	14
3.1.2. Diseño de investigación	14
3.2. Estadística de la investigación.....	14
3.3. Análisis estadístico	15
3.4. Población y muestra.	15
3.5. Modelo estadístico.....	16
3.6. Toma de datos de las variables en estudio.....	16
3.7. Población.....	16
3.8. Muestra	17
3.9. El área experimental.....	17
3.10. Procedimientos de recolección de datos.....	18
3.11. Técnicas e instrumentos.....	18
CAPÍTULO IV: RESULTADOS	19

4.1. Sedimentación en cm. Lodo, agua 30:70 en 1 minuto. Lodo 30. 1'	19
4.2. Sedimentación en cm. Lodo, agua 30:70 en 5 minutos. Lodo 30. 5'	20
4.3. Sedimentación en cm. Lodo, agua 30:70 en 60 minutos. (Lodo 30. 60')	21
4.4. Sedimentación en cm. Lodo, agua 50:50 en 1 minuto. (Lodo 50. 1').....	22
4.5. Sedimentación en cm. Lodo, agua 50:50 en 5 minutos. Lodo 50. 5'	23
4.6. Sedimentación en cm. Lodo, agua 50:50 en 60 minutos. (Lodo 50. 60')	24
CAPÍTULO V: DISCUSIÓN.....	26
CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES	28
CAPÍTULO VII: RECOMENDACIONES	29
CAPÍTULO VIII: FUENTES DE INFORMACIÓN.....	30
ANEXOS	33
1. Mapa de muestreo de suelo contaminado del Incidente Ambiental del km 88 + 180 Oleoducto Corriente- Saramuro	34
2. Mapa satelital del Incidente Ambiental km 88 + 180 Oleoducto Corriente- Saramuro.	35
3. Galería de imágenes de desarrollo del proyecto	36

ÍNDICE DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 1. Prueba de Kruskal Wallis para tiempo de sedimentación (cm) de 1 minutos en la prueba de jarra (Lodo 30. 1').....	19
Cuadro 2. Prueba de Kruskal Wallis para tiempo de sedimentación (cm) de 5 minutos en la prueba de jarra (Lodo 30. 5').....	20
Cuadro 3. Prueba de Kruskal Wallis para tiempo de sedimentación (cm) de 5 minutos en la prueba de jarra (Lodo 30. 60').....	21
Cuadro 4. Prueba de Kruskal Wallis para tiempo de sedimentación (cm) de 1 minuto en la prueba de jarra (Lodo 50. 1')	22
Cuadro 5. Prueba de Kruskal Wallis para tiempo de sedimentación (cm) de 5 minutos en la prueba de jarra (Lodo 50. 5').....	23
Cuadro 6. Prueba de Kruskal Wallis para tiempo de sedimentación (cm) de 5 minutos en la prueba de jarra (Lodo 50. 60').....	24

ÍNDICE DE GRÁFICOS

	Pag.
Gráfico 1. Gráfico de efectos del nivel de concentración de Policloruro de aluminio en medio acuoso Lodo, agua 30:70 en prueba de jarra en 1 minuto.....	19
Gráfico 2. Gráfico de efectos del nivel de concentración de Policloruro de aluminio en medio acuoso Lodo, agua 30:70 en prueba de jarra en 5 minutos.	20
Gráfico 3. Gráfico de efectos del nivel de concentración de Policloruro de aluminio en medio acuoso Lodo, agua 30:70 en prueba de jarra en 60 minutos.	21
Gráfico 4. Gráfico de efectos del nivel de dosificación de Policloruro de aluminio en medio acuoso Lodo, agua 50:50 en prueba de jarra en 1 minuto.....	22
Gráfico 5. Gráfico de efectos del nivel de concentración de Policloruro de aluminio en medio acuoso Lodo, agua 50:50 en prueba de jarra en 5 minutos.	23
Gráfico 6. Gráfico de efectos del nivel de concentración de Policloruro de aluminio en medio acuoso Lodo, agua 50:50 en prueba de jarra en 60 minutos.	24

RESUMEN

Este trabajo de investigación se realizó en el incidente ambiental producido por derrame de hidrocarburo, ubicado en el km 88+180 del Oleoducto Corriente-Saramuro del Lote 8, en la región Loreto, provincia de Loreto, distrito de Urarinas. El objetivo principal fue determinar la dosificación óptima de Policloruro de Aluminio (PAC) en la sedimentación de lodo contaminado con hidrocarburos, se tuvo en cuenta la característica del suelo, el método del ensayo experimental fue la prueba de jarra. El diseño estadístico fue el DCR con treinta repeticiones, las concentraciones fueron 2.0 (t1), 2.5 (t2), 2.5 (t3) y 3.0 (T4), las unidades experimentales fueron en vasos descartables de 100 cc. La estadística de prueba fue de Kruskal -Wallis, teniendo como resultado diferencia significativa para concentraciones de PAC en la sedimentación del lodo en las proporciones lodo-agua (30:70 y 50:50) y tiempos de sedimentación (1,5 y 60 minutos). Estos resultados están referenciados a partir que la eficiencia de la prueba de jarra es mejor a mayor sedimentación en menor tiempo, así, se concluye que con una concentración de 2.0 cc de PAC para la suspensión de lodo y agua en proporciones de 30:70 en un tiempo de 1 minuto la sedimentación es mayor, esta prueba de jarra su aplicación en el tratamiento de suelos en aguajales contaminados con hidrocarburos, podría ayudar a minimizar el impacto ambiental en ecosistemas afectados por derrames de hidrocarburos, por medio de procesos de limpieza y remediación ambiental en la Amazonía Peruana.

Palabras clave: Prueba de jarra, proporción lodo agua, sedimentación, remediación.

ABSTRACT

This research work was carried out in the environmental incident produced by a hydrocarbon **spill**, located at km 88+180 of the Corriente-Saramuro Pipeline of Lot 8, in the Loreto region, province of Loreto, district of Urarinas. The main objective **was** to determine **the optimal** dosage of Polyaluminum Chloride (PAC) in **the** sedimentation of sludge contaminated with hydrocarbons, the soil characteristic was taken into account, **the experimental test** method was the jug test. The statistical design was the DCR with thirty replications, the concentrations were 2.0 (t1), 2.5 (t2), 2.5 (t3) and 3.0 (T4), the experimental units were in disposable cups of 100 cc. The test statistic was Kruskal-Wallis, resulting **in** a significant difference for CAP concentrations in the sludge sedimentation in the sludge-water ratios (30:70 and 50:50) and sedimentation times (1.5 and 60 minutes). These results are referenced from **the fact that the efficiency of the jar test is better the greater the sedimentation in the shorter time**, thus, it is concluded that with a concentration of 2.0 cc of PAC for the suspension of sludge and water **in** proportions of 30:70 in a time of 1 minute the sedimentation is. Furthermore, this jug test, its application in the treatment of soils in hydrocarbon-contaminated wetlands, could help minimize the environmental impact on ecosystems affected by oil spills, through environmental cleanup and remediation processes in the Peruvian Amazon.

Keywords: Pitcher test, sludge-to-water ratio, sedimentation, remediation.

INTRODUCCIÓN

El suelo, descrito por **Volke, T. y Velasco, J.A. (1)**, es un recurso natural que consta de elementos sólidos, líquidos y gaseosos, y se distingue por sus diversas capas. **Silva y Correa (2)** destacan su importancia en múltiples aspectos, como en la producción, el ambiente biótico, la regulación del clima y del agua, el almacenamiento de nutrientes y materias primas, y el control de residuos y polución.

La contaminación del suelo debido a la actividad industrial petrolera es un problema significativo. Los derrames de petróleo son frecuentes en las fases de producción, comercialización, almacenamiento y distribución del petróleo. Dada esta situación, es crucial para la industria petrolera implementar medidas de limpieza y remediar o biorremediar las áreas afectadas. Estos procesos son complicados debido a las propiedades fisicoquímicas de los contaminantes, el alto costo de la rehabilitación y las limitaciones tecnológicas para la recuperación del suelo, especialmente en el manejo del lodo contaminado. En este contexto, la industria busca constantemente la dosis óptima de policloruro de aluminio (PAC) para precipitar y aglutinar los contaminantes (suelo e hidrocarburo) y así facilitar su separación del suelo y el agua mediante la prueba de jarra. El objetivo principal de esta investigación es determinar la dosificación óptima de PAC para la sedimentación del lodo contaminado con hidrocarburo, evaluando el tiempo y la transparencia del agua para medir la eficacia de la prueba de jarra en la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos.

CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes

Betancurt et al (3) estudiaron la calidad del agua cruda del Río Otún. Debido a esto, se necesita un instrumento que permita tomar decisiones rápidas para modificar la dosis de coagulante utilizado en el tratamiento, basado en un criterio cuantificable y preciso como el potencial zeta (ζ). En este estudio se determinó que para un intervalo de ζ de -2.28 mV a +1.2 mV del agua coagulada, se obtienen valores bajos de turbidez y color del agua sedimentada. Es posible alcanzar un óptimo desempeño del proceso de floculación y sedimentación midiendo ζ en el agua coagulada como indicador de desestabilización de las partículas. ζ presenta una correlación positiva con la dosis de coagulante aplicada; modificando la dosis es posible alcanzar valores de ζ cercanos a cero.

Suárez y Trujillo (4) realizaron un estudio de diseño y construcción de un equipo de prueba de jarras para evaluar la tratabilidad de aguas residuales. Concluyeron que este método es muy adecuado para estudios de turbidez, llegando a porcentajes de error de 2%, así como para la evaluación adecuada de coagulantes en concentración y dosificación. Recomiendan su uso en estas pruebas.

Cogollo (5) realizó un estudio del proceso de clarificación en sistemas de tratamiento de aguas industriales usando un coagulante inorgánico polimerizado. Luego, señala los principales coagulantes convencionales utilizados y aborda los policloruros de aluminio (PACs) como integrantes de una nueva generación de coagulantes alternativos con mejor desempeño. Se especifican aspectos técnicos y operativos a considerar al implementar un proceso de clarificación de aguas usando un PAC como coagulante.

Carvalho et al. (6) evaluaron los beneficios de obtener agua potable a partir de coagulantes naturales para la remoción de parámetros como turbidez y compuestos de absorción en UV-254nm, utilizando Tanfloc SS como agente coagulante. Se realizaron ensayos de coagulación/floculación/sedimentación en paralelo “jar test” con agua superficial de alto color/turbidez. Se varió el pH de coagulación (3,0 a 9,0) y la concentración de coagulante (10,0 a 60,0 mg/L) para construir diagramas de coagulación y determinar regiones de mejor eficiencia de remoción. Con los datos, se construyeron diagramas utilizando el programa 3DField. Con base en éstos, para Tanfloc SS las mejores remociones ocurrieron para pH entre 6,0 y 9,0 en todas las concentraciones.

Laines et al. (7) estudiaron que una alternativa para el manejo de residuos sólidos es el relleno sanitario, siendo un problema por el riesgo de contaminación de agua y suelo del lixiviado generado. Se determinó el potencial de coagulación-floculación de mezclas con proporciones variables de almidón de plátano, sulfato de aluminio y arcillas. Para evaluar la efectividad se corrieron testigos de coagulación con sulfato de aluminio y cloruro férrico. El lixiviado fue pretratado y se realizaron pruebas de jarras, midiendo parámetros como turbiedad, color, DQO, pH, SST y conductividad. Con 75 mg/L se redujo la turbiedad a <5 UNT en dos tratamientos. La mayor remoción de color fue con cloruro férrico. Los resultados permitieron establecer la factibilidad de aplicar mezclas coagulantes para el tratamiento de lixiviados y pruebas futuras en aguas residuales.

Lorenzo y Acosta (8) estudiaron el estado del arte del tratamiento de aguas por coagulación y floculación, examinando conceptos generales de este método químico. Se enumeran y explican las etapas químicas del proceso. Se mencionan los floculantes más usados y sus características relevantes. En el proceso influyen factores químicos e hidráulicos que inciden en la selección del mejor

coagulante y su dosis óptima, para lo cual es necesario hacer la “Prueba de Jarras”.

Rodríguez (9) realizó en Cuba el estudio de una solución factible para la clarificación de aguas para consumo mediante la medición del potencial Z, como método de control de la dosis de coagulantes. Se profundiza en el estudio teórico del proceso de coagulación-floculación y se comprueba la similitud con los resultados del método de prueba de jarras en cuanto a la selección de las mejores dosis.

Suárez y Trujillo (4) realizaron un estudio de diseño y construcción de un equipo de prueba de jarras para evaluar la tratabilidad de aguas residuales. Concluyeron que este método es muy adecuado para estudios de turbidez, con porcentajes de error de 2%, así como para la evaluación de coagulantes en concentración y dosificación. Recomiendan su uso en estas pruebas.

Calle y Zambrano (10) en la tesis “Optimización del proceso de floculación y coagulación de la planta potabilizadora de la junta de agua potable de Bayas” concluyen que determinar la dosis óptima de coagulante es uno de los aspectos más importantes. No tenerla determinada para cada turbiedad, hace que el proceso sea ineficiente al utilizar curvas de dosificación de otras plantas. Se obtuvo la curva dosificando coagulante con muestras de diferente turbiedad y color, permitiendo optimizar el proceso al añadir la cantidad exacta de sulfato de aluminio.

1.2. Bases teóricas

Suelo Fundamentos sobre la composición y formación de suelos

El suelo es un sistema complejo compuesto por fases sólida, líquida y gaseosa, que provienen principalmente de la descomposición de materia orgánica y rocas.

Debido a su naturaleza multifacética, existen cientos de tipos de suelos con diversas proporciones de estas fases. **Lladó (11)**.

Contaminación de suelos por derrames de hidrocarburos y sus implicaciones

La contaminación por hidrocarburos altera los suelos y aguas superficiales dada la persistencia y tendencia a propagarse de estas sustancias. El petróleo contiene una intrincada mezcla de compuestos siendo los hidrocarburos mayoritarios. Particularmente, benceno, tolueno, etilbenceno y xileno son altamente dañinos. Los derrames y filtraciones asociados a la producción y transporte petrolero impactan ecosistemas marinos y terrestres a través de cadenas tróficas, repercutiendo en humanos. **Sifuentes (12)**.

El polihidroxiclورو de aluminio como coagulante su estructura, características y clasificación

Según **Proquimsa (13)**, el nombre comercial del coagulante es PAC (Policloruro de aluminio). Su nombre químico es Policloruro de aluminio y en solución es Polihidroxiclورو de aluminio, con fórmula $(Al_2(OH)_nCl_{6-n})_x$.

Globalquim (14) señala que el Policloruro de aluminio (PAC) es una sal polimérica básica de cloruro de aluminio. Esencialmente es un polímero inorgánico catiónico que en solución presenta propiedades óptimas para ser utilizado como coagulante.

Por su parte, **Economía (15)** precisa la clasificación y designación del coagulante. Los policloruros de aluminio conforman productos con distinta composición química. Esta norma incluye polihidroxicluros, polihidroxiclurosilicatos y polihidroxiclurosulfatos de aluminio, disponibles sólidos o líquidos. Se

comercializan con diversos grados de pureza, difiriendo en basicidad, contenidos de cloruros, silicatos, sulfatos y aluminio activo.

Composición y propiedades del polihidroxiclورو de aluminio (PAC) como coagulante

Según **Garcés (16)**, el policloruro de aluminio (PAC) es un coagulante que ha tenido cierto uso en tiempos recientes. Es un producto que se comercializa en forma líquida. Su nombre "policloruro" hace referencia a que en realidad no se trata de un compuesto de fórmula definida, sino de una mezcla de polímeros o agregados de polímeros de hidróxido de cloruro de aluminio con fórmula $Al_n(OH)_mCl_{(3n-m)}$. El PAC contiene concentraciones variables de cloruro de aluminio que se expresan como "porcentaje en peso de Al" entre 2,5% a 13%. El PAC puede prepararse a partir de varias sustancias con aluminio. Los coagulantes de aluminio poliméricos, como el polihidroxiclورو de aluminio ($Al_3[OH]_2[SO_4]_2Cl_{15}$) (PACI), forman especies químicas descritas como de alta carga y moderada masa molar, disponibles rápidamente para la coagulación. Se ha reportado una serie de ventajas respecto a la alúmina, con una menor dependencia de su efectividad a las variaciones de temperatura y pH en comparación con aquella.

Un estudio reciente de Exall & Vanloon (2000), citado por **Abramovich (17)**, sobre las cinéticas de coagulación en suspensiones de arcilla indicó que la desestabilización y formación de flóculos era más rápida después de añadir el coagulante de polialuminio. Esto permite acortar el tiempo de mezclado. Además, señala que el PACI contiene una mayor concentración de óxidos útiles, lo cual indica la calidad y eficacia más elevadas de este coagulante.

Ventajas del uso de policloruro de aluminio (PAC) como coagulante en comparación con otros coagulantes convencionales

Rinne (18) resalta que el coagulante Policloruro de Aluminio (PAC) tiene numerosas ventajas. Su pH óptimo de coagulación puede ser más alto que usando Alumbre. En aguas con alcalinidad alta, el pH de coagulación con PAC puede ser igual al de distribución. Muchas veces se puede usar PAC sin alcalinización. La remoción de sustancias orgánicas es superior con PAC frente a Alumbre. Problemas con agua fría y lentitud en la formación de flóculos frecuentemente se resuelven con PAC por su reacción más rápida. Se han desarrollado varios grados de PACs, pudiendo tener distinta basicidad, presentación líquida o sólida, o cloruros sustituidos por sulfatos. La adición conjunta de PAC y floculante permite una floculación muy rápida con dosis químicas muy bajas.

Según lo citado en Cogollo (5), el hidroxiclorigenato de aluminio $\text{Al}_2(\text{OH})_5\text{Cl}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ es una sal inorgánica multinuclear de aluminio (PAC) que forma flóculos con mayor rapidez, velocidad de sedimentación, poder clarificante y remociones más altas de turbidez respecto a sales mononucleares como el sulfato de aluminio. Su pH óptimo está entre 5.0 y 9.0 dependiendo del contenido de carbono orgánico disuelto. Se presenta comercialmente como un líquido ligeramente viscoso, de color ámbar claro, que tiene una fácil dosificación sin residuos insolubles indeseados que dañan equipos, a diferencia de coagulantes convencionales granulados.

Fundamentos y procedimiento operativo del método de prueba de jarras (Jar Test) para evaluación de tratabilidad de aguas

Según lo indicado por **Marín (19)**, el método de Jar Test fue estandarizado en 1980 mediante una norma ASTM de Estados Unidos. Este ensayo se enfoca en

evaluar el tratamiento de un agua para reducir sólidos disueltos, sólidos suspendidos, materias coloidales y no sedimentables, mediante coagulación y posterior decantación por gravedad. El Jar Test permite evaluar a escala de laboratorio la disminución de color, turbidez y dureza del agua bruta. Esta serie de ensayos de coagulación-floculación se realiza para determinar reactivos químicos potencialmente utilizables, dosis a aplicar y condiciones requeridas para un resultado óptimo, como pH, temperatura y orden de adición.

Asimismo, Marín (19) indica que para ejecutar el procedimiento operativo del Jar Test, la norma americana sugiere después de añadir cada reactivo: mezcla rápida durante 1 minuto a 120 rpm; mezcla lenta durante 20 minutos para homogenizar la suspensión formada; y esperar 15 minutos para determinaciones finales sobre el agua. Señala que los tiempos y velocidades son orientativos, siendo usuales variaciones prácticas en la técnica.

Fundamentos del proceso de clarificación de aguas y cinética de la formación de flóculos

Según Cogollo (5), la clarificación del agua tiene por objeto retirar sólidos suspendidos, sólidos finamente divididos y materiales coloidales, convirtiéndolos en partículas más grandes que se pueden remover más fácilmente. Es un proceso utilizado tanto en sistemas de tratamiento de aguas municipales para obtener agua potable, como en sistemas de tratamiento de aguas industriales. La clarificación incluye coagulación, floculación y sedimentación.

De acuerdo con **Restrepo (20)**, tan pronto se agregan coagulantes a una suspensión coloidal, se inician reacciones hidrolíticas que adhieren iones a la superficie de las partículas presentes, las cuales tienen oportunidad de unirse por colisiones sucesivas hasta formar flóculos que crecen con el tiempo. La

rapidez con que esto ocurre depende del tamaño y concentración de las partículas, y de su “grado de desestabilización”, que permite que las colisiones sean efectivas para producir adherencia.

Factores que influyen en la eficiencia del proceso de floculación

Según **Restrepo (20)**, la velocidad de formación del floculo es proporcional a la concentración de partículas en el agua y del tamaño inicial de estas. Por otro lado, **Vargas (21)** señala que existe especulación sobre el efecto de la concentración de la solución de coagulante en la eficiencia del tratamiento, sugiriéndose limitar la concentración mínima a 0,5%. Pero esto contradice el procedimiento usual en ensayos de laboratorio, que usan concentraciones de 0,1 y 0,2% dependiendo del volumen de los frascos y de las dosis previstas.

De acuerdo con Restrepo (20), la velocidad de aglomeración de las partículas es proporcional al tiempo de detención, que debe estar lo más cerca del óptimo determinado con pruebas de jarras. Esto se logra dividiendo la unidad de floculación en cámaras, donde para una eficiencia dada se obtienen tiempos menores al aumentar el número de cámaras en serie, con un mínimo de tres unidades.

Asimismo, Restrepo (20) afirma que el gradiente de velocidad es proporcional a la velocidad de aglomeración de partículas, existiendo un límite máximo para evitar el rompimiento del floc. El gradiente debe ser decreciente sin cámaras intermedias con gradientes muy elevados.

Finalmente, Vargas (21) señala que las características del agua cruda que más influyen son: concentración de coloides, alcalinidad y pH, tamaño de partículas y temperatura.

1.3. Definición de términos básicos

Suelo. El suelo es un elemento natural con múltiples funciones. Proporciona nutrientes y soporte a las plantas y contiene materia orgánica derivada de residuos animales y vegetales **(2)**.

Hidrocarburo. Los hidrocarburos son compuestos orgánicos formados principalmente por carbono e hidrógeno. Varían en complejidad desde el simple metano hasta estructuras más complejas como los hidrocarburos aromáticos policíclicos. Estos compuestos se organizan en diferentes estructuras moleculares, ya sean lineales, ramificadas o cíclicas **(22)**.

Suelos contaminados. Un suelo se considera contaminado cuando sus características físicas, químicas o biológicas se ven negativamente afectadas por sustancias peligrosas de origen humano, en niveles que representan un riesgo para la salud humana o el ambiente **(12)**.

Coagulación. Este proceso implica la unión de partículas suspendidas y coloidales en el agua mediante la adición de coagulantes **(23)**.

Floculación. Es la formación de aglomerados más grandes, llamados flóculos, a partir de partículas desestabilizadas durante la coagulación, mediante agitación moderada del agua **(9)**.

Sedimentación. Este proceso ocurre cuando los hidrocarburos aumentan su densidad y se hunden en el agua o cuando partículas suspendidas en el agua se adhieren a ellos **(24)**.

Sedimentación de partículas floculantes. Se refiere a la caída de partículas coloidales desestabilizadas que se han aglomerado por agentes químicos, cambiando sus características durante la caída. Este proceso es importante en la clarificación de aguas **(25)**.

Sedimentación simple. Es el depósito de partículas discretas, común en desarenadores, sedimentadores y presedimentadores antes de la coagulación en plantas de filtración rápida, así como en sedimentadores previos a la filtración lenta **(25)**.

Prueba de jarra. Un ensayo de laboratorio que replica los procesos de oxidación química, coagulación, floculación y sedimentación en una planta **(23)**.

Turbidez. La turbidez se refiere a la reducción de transparencia del agua, causada por partículas sólidas en suspensión, afectando la dispersión y el paso de la luz. Se mide en Unidades Nefelométricas de Turbiedad. **(21); (26)**.

CAPITULO II: HIPÓTESIS Y VARIABLES

2.1. Formulación de la hipótesis

Una dosificación óptima de policloruro de aluminio (PAC) mejora significativamente la sedimentación del lodo y la transparencia del lodo de suelos aguajales contaminados con hidrocarburo.

2.2. Variables y su operacionalización

- **Variables.**
 - **Variable independiente:** X. Dosificación de Policloruro de Aluminio (PAC)
 - **Variable dependiente:** Y. Sedimentación de lodo contaminado con hidrocarburos.

- **Operacionalización**
 - **Variable independiente**
 - X. Dosificación de PAC
 - X₁. 1.5 cc
 - X₂. 2.0 cc
 - X₃. 2.5 cc
 - X₄. 3.0 cc
 - **Variable dependiente**
 - Y. Sedimentación de lodo contaminado con hidrocarburos
 - Y₁. Sedimentación de lodo (30, 1')
 - Y₂. Sedimentación de lodo (30, 5')
 - Y₃. Sedimentación de lodo (30, 60')
 - Y₄. Sedimentación de lodo (50, 1')

Y₅. Sedimentación de lodo (50, 5')

Y₆. Sedimentación de lodo (50, 60')

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

3.1. Tipo y diseño.

3.1.1. Tipo de investigación.

La investigación es experimental, prospectiva, transversal, analítica y de nivel explicativo con enfoque es cuantitativo, básico y aplicativo. Diseño es experimental. Nivel explicativo.

3.1.2. Diseño de investigación

Se empleó el Diseño Completamente Randomizado (DCR) con 30 replicaciones en un tiempo de 2 meses consecutivos. En el presente ensayo se utilizaron vasos descartables (Unidades experimentales), a las cuales se les asignó aleatoriamente las diferentes dosificaciones de policloruro de aluminio, consistente en cuatro concentraciones de PAC: 1.50 (T1), 2.00 (T2), 2.50 (T3) y 3.00 (T4), aplicados independientemente en 30 pruebas de jarra, consistentes en vasos con lodo y agua del suelo aguajal contaminado con hidrocarburos para medir la sedimentación del lodo y la transparencia del agua en suspensión.

3.2. Estadística de la investigación.

La variancia entre dosificaciones de Policloruro de aluminio en relación a la prueba de jarra con 4 concentraciones aplicados en vasos descartables con lodo y agua en suspensión, primero se evaluó la distribución normal y la homogeneidad de variancias con la prueba de Bartlett y de Levene, no cumpliendo la variable sedimentación con los supuestos de normalidad y homocedasticidad, se utilizó la prueba no paramétrica Kruskal-Wallis.

3.3. Análisis estadístico

Se empleó la estadística inferencial para analizar los datos, con presentación de gráficos y cuadros. La comparación de las distintas dosificaciones de PAC en lodo y agua en suspensión se realizó mediante análisis de varianza y pruebas de comparación múltiple. El procesamiento de datos se realizó con el software InfoStat.

3.4. Población y muestra.

La población consiste en todo el lodo del área experimental.

Se empleó una muestra de 30 unidades elementales ($n=30$) por tratamiento. El número de unidades elementales a registrar (observaciones) en forma aleatoria por tratamiento es de 30 (n). Las unidades de estudio lo conforman todos los vasos en cuyo interior se llenó con agua en sedimentación y lodo del suelo aguajal contaminado, con la concentración de PAC en función a cada tratamiento. Cada unidad elemental (vasos) fueron uniformes en tamaño, diámetro, ubicación, con la finalidad de evaluar el verdadero efecto de las dosificaciones de PAC en las características físicas del proceso prueba de jarra.

- **Tratamiento en estudio.** *Dosificación de Policloruro de aluminio*)

Los tratamientos en estudio los constituyen los cuatro grupos de control, como factor principal de estudio por tanto es CONCENTRACIÓN DE POLICLURURO DE ALUMINIO.

T₁. 1.50 cc

T₂. 2.00 cc

T₃. 2.50 cc

T₄. 3.00 cc

- **Unidades experimentales**

Tratamientos: 04

Unidades experimentales: (vasos descartables) 4 x 30: 120

Muestra por repeticiones: 30

- **Espacio experimental**

Largo: 3.0 m

Ancho: 1.0 m

Área total: 3.0 m²

3.5. Modelo estadístico

El modelo estadístico es Lineal mixto

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij}$$

Donde:

Y_{ij} : Es la variable respuesta para el i-ésimo tratamiento y la j-ésima repetición.

μ : Es la media general de la variable respuesta.

τ_i : Es el efecto del i-ésimo tratamiento (variación entre tratamientos).

ε_{ij} : Es el efecto de la j-ésima repetición sobre el i-ésimo tratamiento (error aleatorio).

3.6. Toma de datos de las variables en estudio.

Dosificación de Policloruro de aluminio. Es la variable cualitativa factor principal de estudio, cuatro concentraciones, registró la variable respuesta sedimentación del lodo tratado en el proceso de la prueba de jarra.

3.7. Población

La población de estudio está constituida por el lodo de aguajal contaminado con hidrocarburo- Determinar si la densidad de lodo con hidrocarburo en el km 88 del oleoducto Corriente Saramuro en Loreto.

3.8. Muestra

El tamaño de la muestra lo constituyen 30 vasos de ensayos por cada tratamiento.

3.9. El área experimental.

El área experimental lo constituye el espacio enlodado del Incidente Ambiental km 88+180 Oleoducto Corriente- Saramuro.

a) Etapa de campo

Dosificación de PAC en el Lodo

Paso 01. Bombeo de lodo del incidente, la cual es transportado por medio mangueras con bombas sumergibles hacia el punto del acopio (PIT)

Paso 02. En el PIT se saca una muestra del lodo en un recipiente, para luego homogenizar la muestra.

Paso 03. La muestra de lodo es trasladada al laboratorio para su respectivo análisis físico y química.

b) Etapa de laboratorio

En esta etapa se realizarán los datos físicos, transparencia, sedimentación.

Pasos:

Paso 01. Pesado de la muestra de lodo (contrastando la diferencia)

Paso 02. Roturación de los vasos para su respectiva identificación al momento del análisis.

Paso 03. Se realiza el pesado de los vasos en vacío, utilizando una balanza electrónica.

Paso 04. Se realiza el pesado de los vasos llenos con agua, utilizando una balanza electrónica.

Paso 05. Se realiza el pesado de los vasos llenos con agua y lodo según los tratamientos establecidos, utilizando una balanza electrónica.

Paso 06. Se procede a la preparación de la solución PAC- 100, a una dosis de 1.0 % x 100 cc) de agua.

Paso 07. Cada vaso se agita independientemente de forma manual y se obtiene el peso (PAC-100) utilizando la balanza digital electrónica.

Paso 08. Se empieza el proceso de la prueba de jarra con la aplicación del químico PAC- 100, a una dosis de 1.0 % por vaso (100 cc).

Paso 09. Se empieza el proceso de la prueba de jarra con la aplicación del químico PAC- 100, a diferentes dosificaciones por vaso (100 cc).

3.10. Procedimientos de recolección de datos

El presente trabajo experimental se realizó en el km 88 + 180 del oleoducto corriente –Saramuro Rio Chambira, Departamento de Loreto, Provincias de Loreto, Distrito de Urarinas.

3.11. Técnicas e instrumentos

La evaluación de las variables de respuesta, se midieron los factores físicos determinados por la densidad de lodo con hidrocarburo.

Entre las variables respuestas de las condiciones físicas del lodo visiblemente observable como la viscosidad a efectos de la densidad de lodo en la prueba de jarra con diferentes concentraciones de PAC en diferentes tiempos de sedimentación.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS

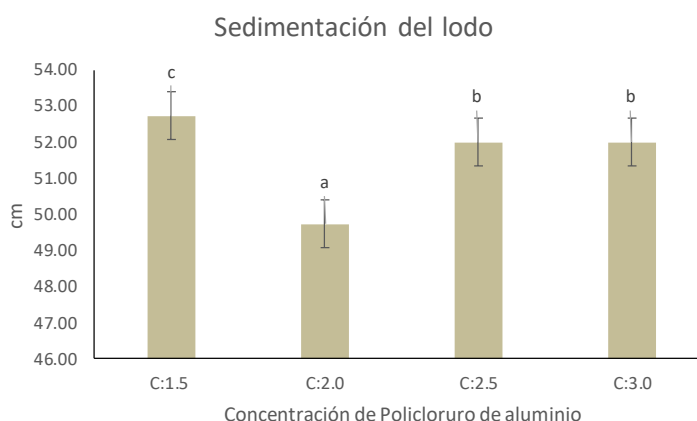
4.1. Sedimentación en cm. Lodo, agua 30:70 en 1 minuto. Lodo 30. 1'

El análisis estadístico de la prueba de Kruskal-Wallis indica que existe una diferencia estadística altamente significativa para la concentración de Policloruro de aluminio (PAC) en la sedimentación del lodo contaminado con hidrocarburos en una proporción de 30:70 de lodo y agua en el método de la prueba de jarra en tiempo de 1 minuto; esta significancia sugiere que la concentración de PAC influye en el proceso de sedimentación de esta proporción de lodo y agua en el tiempo de 1 minuto.

Cuadro 1. Prueba de Kruskal Wallis para tiempo de sedimentación (cm) de 1 minutos en la prueba de jarra (Lodo 30. 1')

Concentración de Policloruro de aluminio	Medias	D.E.	Medianas	Rangos	H	p-valor
C:1.5	52.73	0.78	53.00	15.50	76.46	<0.0001
C:2.0	49.73	1.34	50.00	67.50		
C:2.5	52.00	0.00	52.00	67.50		
C:3.0	52.00	0.00	52.00	91.50		

Gráfico 1. Gráfico de efectos del nivel de concentración de Policloruro de aluminio en medio acuoso Lodo, agua 30:70 en prueba de jarra en 1 minuto.



El gráfico 1 indica que la concentración 2.0 mm por vaso de policloruro de aluminio para la sedimentación de un suelo aguajal contaminado con hidrocarburo, evaluado por la prueba de jarra en una suspensión acuoso Lodo, agua 30:70 en el tiempo de 1 minuto, tiene mejor efecto en la mayor

sedimentación, por tanto, es más efectiva para aglutinar y precipitar los contaminantes presentes en el suelo y agua en comparación con las otras concentraciones evaluadas.

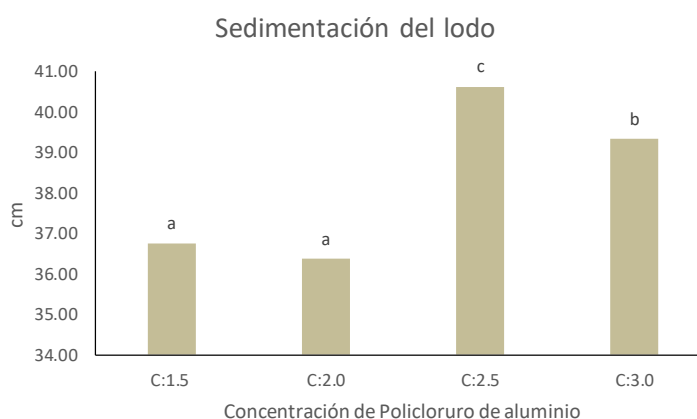
4.2. Sedimentación en cm. Lodo, agua 30:70 en 5 minutos. Lodo 30. 5'

El análisis estadístico de la prueba de Kruskal-Wallis indica que existe una diferencia estadística altamente significativa para la concentración de Policloruro de aluminio (PAC) en la sedimentación del lodo contaminado con hidrocarburos en una proporción de 30:70 de lodo y agua en el método de la prueba de jarra en tiempo de 5 minutos; esta significancia sugiere que la concentración de PAC influye en el proceso de sedimentación de esta proporción de lodo y agua en el tiempo de 5 minutos.

Cuadro 2. Prueba de Kruskal Wallis para tiempo de sedimentación (cm) de 5 minutos en la prueba de jarra (Lodo 30. 5')

Concentración de Policloruro de aluminio	Medias	D.E.	Medianas	Rangos	H	p-valor
C:1.5	36.77	0.00	2.00	26.50	70.21	<0.0001
C:2.0	36.37	0.45	2.00	42.50		
C:2.5	40.63	0.00	3.00	86.50		
C:3.0	39.33	0.00	3.00	86.50		

Gráfico 2. Gráfico de efectos del nivel de concentración de Policloruro de aluminio en medio acuoso Lodo, agua 30:70 en prueba de jarra en 5 minutos.



El gráfico 2 indica que la concentración 2.0 mm por vaso de policloruro de aluminio para la sedimentación de un suelo aguajal contaminado con

hidrocarburo, evaluado por la prueba de jarra en una suspensión acuoso Lodo, agua 30:70 en el tiempo de 5 minutos, tiene mejor efecto en la mayor sedimentación, por tanto, es más efectiva para aglutinar y precipitar los contaminantes presentes en el suelo y agua en comparación con las otras concentraciones evaluadas.

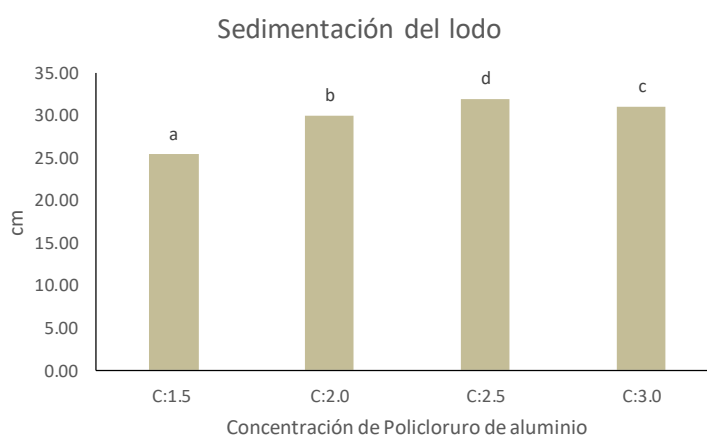
4.3. Sedimentación en cm. Lodo, agua 30:70 en 60 minutos. (Lodo 30. 60')

El análisis estadístico de la prueba de Kruskal-Wallis indica que existe una diferencia estadística altamente significativa para la concentración de Policloruro de aluminio (PAC) en la sedimentación del lodo contaminado con hidrocarburos en una proporción de 30:70 de lodo y agua en el método de la prueba de jarra en tiempo de 60 minutos; esta significancia sugiere que la concentración de PAC influye en el proceso de sedimentación de esta proporción de lodo y agua en el tiempo de 60 minutos.

Cuadro 3. Prueba de Kruskal Wallis para tiempo de sedimentación (cm) de 5 minutos en la prueba de jarra (Lodo 30. 60')

Concentración de Policloruro de aluminio	Medias	D.E.	Medianas	Rangos	H	p-valor
C:1.5	25.47	0.78	25.00	15.50	111.57	<0.0001
C:2.0	30.00	0.00	30.00	45.50		
C:2.5	32.00	0.00	32.00	105.50		
C:3.0	31.00	0.00	31.00	75.00		

Gráfico 3. Gráfico de efectos del nivel de concentración de Policloruro de aluminio en medio acuoso Lodo, agua 30:70 en prueba de jarra en 60 minutos.



El gráfico 3 indica que la concentración 2.0 mm por vaso de policloruro de aluminio para la sedimentación de un suelo aguajal contaminado con hidrocarburo, evaluado por la prueba de jarra en una suspensión acuoso Lodo, agua 30:70 en el tiempo de 60 minutos, tiene mejor efecto en la mayor sedimentación, por tanto, es más efectiva para aglutinar y precipitar los contaminantes presentes en el suelo y agua en comparación con las otras concentraciones evaluadas.

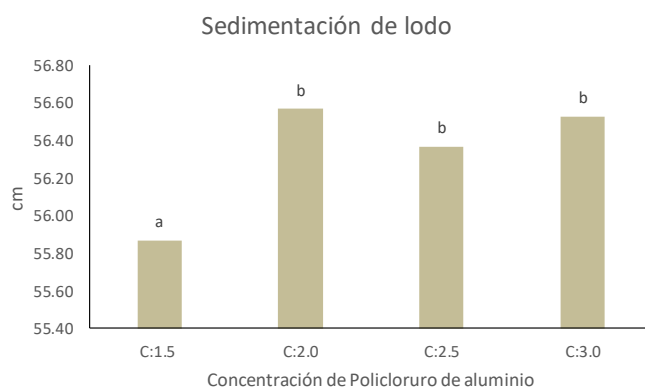
4.4. Sedimentación en cm. Lodo, agua 50:50 en 1 minuto. (Lodo 50. 1')

El análisis estadístico de la prueba de Kruskal-Wallis indica que existe una diferencia estadística altamente significativa para la concentración de Policloruro de aluminio (PAC) en la sedimentación del lodo contaminado con hidrocarburos en una proporción de 50:50 de lodo y agua en el método de la prueba de jarra en tiempo de 1 minuto; esta significancia sugiere que la concentración de PAC influye en el proceso de sedimentación de esta proporción de lodo y agua en el tiempo de 1 minuto.

Cuadro 4. Prueba de Kruskal Wallis para tiempo de sedimentación (cm) de 1 minuto en la prueba de jarra (Lodo 50. 1')

Concentración de Policloruro de aluminio	Medias	D.E.	Medianas	Rangos	H	p-valor
C:1.5	55.87	0.51	56.00	35.17	21.73	<0.0001
C:2.0	56.57	0.90	57.00	72.65		
C:2.5	56.37	1.10	57.00	67.02		
C:3.0	56.53	0.68	57.00	67.17		

Gráfico 4. Gráfico de efectos del nivel de dosificación de Policloruro de aluminio en medio acuoso Lodo, agua 50:50 en prueba de jarra en 1 minuto.



El gráfico 4 indica que la concentración 1.50 mm por vaso de policloruro de aluminio para la sedimentación de un suelo aguajal contaminado con hidrocarburo, evaluado por la prueba de jarra en una suspensión acuoso Lodo, agua 50:50 en el tiempo de 1 minuto, tiene mejor efecto en la mayor sedimentación, por tanto, es más efectiva para aglutinar y precipitar los contaminantes presentes en el suelo y agua en comparación con las otras concentraciones evaluadas.

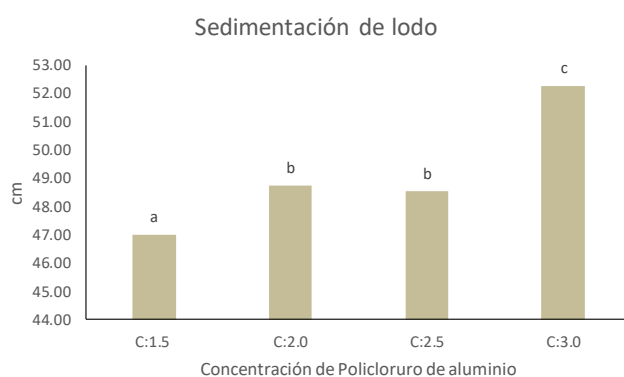
4.5. Sedimentación en cm. Lodo, agua 50:50 en 5 minutos. Lodo 50. 5'

El análisis estadístico de la prueba de Kruskal-Wallis indica que existe una diferencia estadística altamente significativa para la dosis de Policloruro de aluminio (PAC) en la sedimentación del lodo contaminado con hidrocarburos en una proporción de 50:50 de lodo y agua en el método de la prueba de jarra en tiempo de 5 minutos; esta significancia sugiere que la concentración de PAC influye en el proceso de sedimentación de esta proporción de lodo y agua en el tiempo de 5 minutos.

Cuadro 5. Prueba de Kruskal Wallis para tiempo de sedimentación (cm) de 5 minutos en la prueba de jarra (Lodo 50. 5')

Concentración de Policloruro de aluminio	Medias	D.E.	Medianas	Rangos	H	p-valor
C:1.5	47.00	1.65	46.00	28.23	77.27	<0.0001
C:2.0	48.73	1.46	48.00	55.90		
C:2.5	48.53	1.28	48.50	52.72		
C:3.0	52.27	0.69	52.00	105.15		

Gráfico 5. Gráfico de efectos del nivel de concentración de Policloruro de aluminio en medio acuoso Lodo, agua 50:50 en prueba de jarra en 5 minutos.



El gráfico 5 indica que la concentración 1.50 mm por vaso de policloruro de aluminio para la sedimentación de un suelo aguajal contaminado con hidrocarburo, evaluado por la prueba de jarra en una suspensión acuoso Lodo, agua 50:50 en el tiempo de 5 minutos, tiene mejor efecto en la mayor sedimentación, por tanto, es más efectiva para aglutinar y precipitar los contaminantes presentes en el suelo y agua en comparación con las otras concentraciones evaluadas.

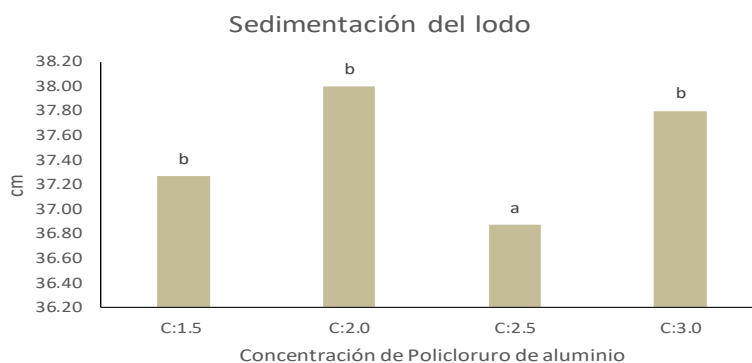
4.6. Sedimentación en cm. Lodo, agua 50:50 en 60 minutos. (Lodo 50. 60')

El análisis estadístico de la prueba de Kruskal-Wallis indica que existe una diferencia estadística altamente significativa para la concentración de Policloruro de aluminio (PAC) en la sedimentación del lodo contaminado con hidrocarburos en una proporción de 50:50 de lodo y agua en el método de la prueba de jarra en tiempo de 60 minutos; esta significancia sugiere que la concentración de PAC influye en el proceso de sedimentación de esta proporción de lodo y agua en el tiempo de 60 minutos.

Cuadro 6. Prueba de Kruskal Wallis para tiempo de sedimentación (cm) de 5 minutos en la prueba de jarra (Lodo 50. 60')

Concentración de Policloruro de aluminio	Medias	D.E.	Medianas	Rangos	H	p-valor
C:1.5	37.27	2.02	38.00	60.02	22.58	<0.0001
C:2.0	38.00	0.00	38.00	76.00		
C:2.5	36.87	0.90	37.00	36.40		
C:3.0	37.80	0.81	38.00	69.08		

Gráfico 6. Gráfico de efectos del nivel de concentración de Policloruro de aluminio en medio acuoso Lodo, agua 50:50 en prueba de jarra en 60 minutos.



El gráfico 6 indica que la concentración 2.50 mm por vaso de policloruro de aluminio para la sedimentación de un suelo aguajal contaminado con hidrocarburo, evaluado por la prueba de jarra en una suspensión acuoso Lodo, agua 50:50 en el tiempo de 60 minutos, tiene mejor efecto en la mayor sedimentación, por tanto, es más efectiva para aglutinar y precipitar los contaminantes presentes en el suelo y agua en comparación con las otras concentraciones evaluadas.

CAPÍTULO V: DISCUSIÓN

Los resultados del presente estudio confirman que la prueba de jarras es una técnica efectiva para evaluar tratamientos de sedimentación de lodos contaminados con hidrocarburos, al respecto **Suárez & Trujillo (4)**; quienes estudiaron, el diseño y construcción de un equipo de prueba de jarras para la tratabilidad de aguas residuales, indican que para estudios de turbiedad este método es muy adecuado y llegando a porcentajes de error de 2%, así como la evaluación adecuada de coagulantes, tanto en concentración como en dosificación; recomendando su uso en estas pruebas.

Así mismo la prueba de jarra es una técnica sencilla y rápida que consiste en agregar un coagulante, como el PAC, a una muestra de suelo contaminado con hidrocarburos y agua, y observar la sedimentación de las partículas en un tiempo determinado **(27)**. En este estudio fue lograr una mayor sedimentación en un menor tiempo, lo que indica una mayor eficiencia del coagulante y una menor cantidad de residuos generados. Específicamente, se determinó que la proporción óptima de lodo: agua es 30:70 con una dosis de 2 cm de PAC por vaso, la cual permite obtener una mayor velocidad de sedimentación, al respecto, según lo reportado por **Vallejos et al (28)**, las mediciones realizadas con el sistema óptico desarrollado presentan concordancia con los datos obtenidos mediante técnicas estándar con probetas, y proporcionan una mayor precisión en la velocidad de sedimentación. Sobre esto, **Vargas (21)** señala que la especulación respecto a limitar la concentración mínima de la solución de coagulante a 0.5% en plantas de tratamiento contradice el procedimiento habitual en ensayos de laboratorio, donde comúnmente se emplean concentraciones de 0.1 y 0.2%, en función del volumen de los equipos de floculación. De este modo, el aporte de Vallejos et al. respecto a la efectividad del sistema óptico implementado se ve respaldado por la argumentación de Vargas sobre la validez de utilizar soluciones

coagulantes en los rangos de concentración de los ensayos de laboratorio, para la representatividad de los procesos a escala real.

La contaminación de los suelos con hidrocarburos es un problema ambiental grave que afecta a la calidad del suelo, el agua y el aire. Los hidrocarburos son compuestos orgánicos persistentes, tóxicos y bioacumulativos que pueden causar daños a la salud humana y a los ecosistemas **(29)**. Por ello, se requieren técnicas y tecnologías eficientes y económicas para la remediación de los suelos contaminados.

En este estudio, se evaluó el efecto de la dosificación de PAC, la proporción de lodo y agua, y el tiempo de sedimentación en la remediación de un suelo aguajal contaminado con hidrocarburos. Los resultados mostraron que la dosificación de PAC tiene una influencia estadísticamente significativa en la sedimentación del lodo, siendo más efectiva a mayor concentración. Lo cual indican que la proporción 30:70 de lodo: agua maximiza la eficiencia de sedimentación, en comparación con la proporción 50:50. Asimismo, el tiempo de 1 minuto resultó más óptimo que periodos de 5 o 60 minutos. No obstante, **Rinne (18)** resalta diversas ventajas del uso de Policloruro de Aluminio (PAC) como coagulante, incluyendo un pH óptimo de coagulación potencialmente más alto respecto a otras sales metálicas; de tal modo el PAC sigue representando una alternativa prometedora para el tratamiento de lodos contaminados con hidrocarburos, incluso si los tiempos de sedimentación obtenidos en este estudio para este coagulante fueron relativamente más prolongados.

CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES

La prueba de Kruskal-Wallis muestra diferencia estadística altamente significativa para la dosificación de Policloruro de aluminio (PAC) en la sedimentación del lodo de un suelo aguajal contaminado con hidrocarburo en las proporciones de lodo y agua (30:70 y 50:50) y a los tiempos de sedimentación (1 minuto, 5 minutos y 60 minutos)

En la prueba de jarra cuando mayor es la sedimentación en un menor tiempo de proceso, la eficiencia de la concentración de PAC será mejor, también está en función de la consistencia de las suspensiones lodo y agua, por tanto, es pertinente afirmar que la concentración óptima de Policloruro de aluminio en el proceso de sedimentación en las proporciones lodo agua de 30:70 es de 2.0 mm por vaso.

El estudio permite aseverar que la mejor eficiencia de la prueba de jarra en la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos, está basada en la proporción lodo agua de 30:70 con una concentración de 2.0 cm de PAC en vasos descartables de 100 mm en función al tiempo y sedimentación.

Es de interés económico y ambiental para el proceso de remediación al utilizar la prueba de jarra justamente minimizar el impacto ambiental y los costos que genera las actividades para recuperar los suelos contaminados con hidrocarburos, de este modo, el reto es lograr una mayor sedimentación en un menor tiempo, lo que indica que así se puede acelerar el proceso de remediación de los suelos contaminados por hidrocarburos.

CAPÍTULO VII: RECOMENDACIONES

El estudio permite recomendar que en el proceso de remediación de un suelo aguajal contaminado con hidrocarburo utilizar una concentración óptima de PAC de 2.0 mm por vaso en una suspensión de 30:70 lodo y agua en un tiempo de 1 minuto en la prueba de jarra.

Continuar con investigaciones con otras concentraciones registrando otros parámetros físicos como granulosis y transparencia de las suspensiones en otras proporciones de lodo agua y tiempos de sedimentación.

Realizar más estudios para confirmar los mecanismos específicos que controlan la cinética de floculación y sedimentación en estas condiciones. Asimismo, se debe evaluar la adaptabilidad del tratamiento para diversos tipos de suelos y contaminantes.

Del presente estudio se desprende la necesidad que resulta la implementación de programas de capacitación y concientización para las empresas y de las comunidades que son afectadas por contaminación por hidrocarburos de sus ecosistemas a fin que ambas partes muestren responsabilidad social coherente con el bienestar económico, social y ambiental.

Finalmente es preciso que se pruebe otras tecnologías de remediación a fin de afrontar el problema de contaminación por hidrocarburos en suelos aguajales que podrían dar resultados efectivos o que se complementen con el método PAC de la prueba de jarra, esto debido a las condiciones biofísicas propias de los ecosistemas amazónicos.

CAPÍTULO VIII: FUENTES DE INFORMACIÓN

1. **Volke, T., y Velasco, J.A.** 2002. Tecnologías de remediación para suelos contaminados. INE-SEMARNAT. México. 64 p.
2. **Silva, S., y Correa, F.** 2009. Análisis de la contaminación del suelo: Revisión normativa y posibilidades de la regulación económica. Rev. Semestre económico. 12 (23): 13-34 p.
3. **Betancurt, C., Jiménez, G., y Linares, B.** 2012. Potencial Zeta (Z) como criterio de optimización de dosificación de coagulante en planta de tratamiento de agua potable. Colombia. 18 p.
4. **Suárez, V., y Trujillo, D.** 2011. Diseño y construcción de un equipo de prueba de jarras para la tratabilidad de aguas residuales. Ecuador. 5 p.
5. **Cogollo J.** 2011. Clarificación de aguas usando coagulantes polimerizados: caso del hidroxiclورو de aluminio. Colombia. 78 p.
6. **Carvalho, M., Konradt-Moraes, L., Bergamasco, R., Sakaniva, B., y Granhen, C.** 2010. Os beneficios de utilização de coagulantes naturais para a obtenção de água potável. Acta Scientiarum. Brasil. 18 p.
7. **Laines, J., Goñi, J., Adams, R., y Camacho, W.** 2008. Mezclas con potencial coagulante para tratamiento de lixiviados de un relleno sanitario. Venezuela. 16 p.
8. **Lorenzo – Acosta Y.** 2006. Estado del arte del tratamiento de aguas por coagulación y floculación. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar Ciudad de La Habana. Cuba. 10-17 p.
9. **Rodriguez, C.** 1995. Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de agua. Santafe de Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá. 17 p.
10. **Calle, L. y Zambrano, C.** 2015. "Optimización del proceso de floculación y coagulación de la planta potabilizadora de la junta de agua potable de bayas. Tesis para optar el título de Ingeniero Químico. Universidad de Cuenca. Ecuador. 23 p.
11. **Lladó, F.** 2012. Biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos pesados y caracterización de comunidades microbianas implicadas". Editorial; España de. Universidad de Barcelona. Editorial; España de Creative Commons. España. 16 p.
12. **Sifuentes, E.** 2011). Producción de inóculo de *Pleurotus ostreatus* para uso en biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos de petróleo. Universidad Nacional la Molina, Lima. Recuperado de

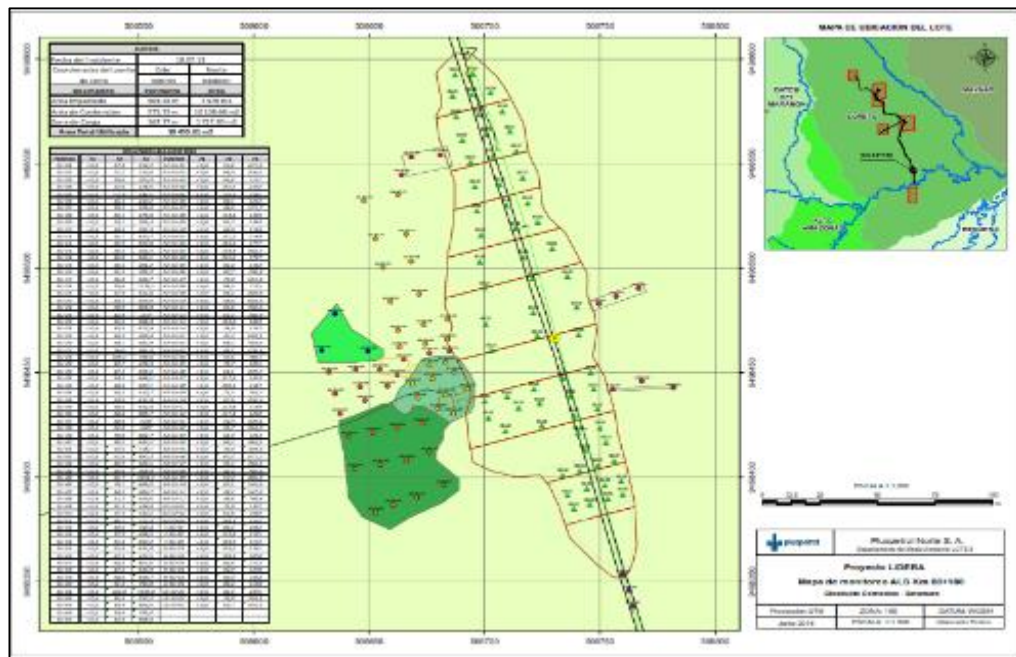
<https://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/1874/T01-S53-T.pdf?sequence=5&isAllowed=y>

13. **Proquimsa** (2006). Hoja de seguridad de materiales. Ecuador.
14. **Globalquim** (2012). Ficha técnica del policloruro de aluminio 18%.
15. Economía (2006). Potabilización del agua para uso y consumo humano Policloruro de aluminio-Especificaciones y métodos de prueba. México. 43 p.
16. **Garcés, R.** 2010. Obtención de la mínima dosis de reemplazo de policloruro de aluminio en aguas y aguas de Pereira. Tesis para optar el título de Ingeniero Industrial. Universidad Tecnológica de Pereira. Colombia. 38 p.
17. **Abramovich, B.** 2005. Remoción de enteroparásitos en agua por coagulación, floculación y sedimentación. Argentina. 55 p.
18. **Rinne, T.** 2002. Potabilización con diferentes coagulantes de aluminio y hierro. México. 7 p.
19. **Marín, R.** 1998. Jar test en el tratamiento de aguas: Una valiosa herramienta. Colombia. 25 p.
20. **Restrepo, H.** 2009. Evaluación del proceso de coagulación - floculación en un planta de tratamiento de agua potable. Medellín - Colombia: Universidad Nacional de Colombia. 16 p.
21. **Vargas, L.** (2004). Floculación. Lima: CEPIS. Programa de Protección de la Salud Ambiental-HPE Evaluación de plantas de tratamiento de agua. Perú. 28 p.
22. **Melendi, D.** (2012). Hidrocarburos. Recuperado 31 de agosto de 2021, de <https://www.mendoza.conicet.gov.ar/portal/enciclopedia/terminos/Hidrocarb.htm>
23. **Romero, J.** 2002. Purificación del Agua. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería. Colombia. 21 p.
24. **Seguridad Global.** (2017). Derrames de hidrocarburos. Recuperado 8 de abril de 2019, de <http://absorbentesderrames.com.ar/tag/derrames-de-hidrocarburos/>
25. **Maldonado, V.** 2004. Sedimentación. CEPIS. Programa de Protección de la Salud Ambiental-HPE Evaluación de plantas de tratamiento de agua. Perú. 10-35 p.
26. Pineda, M. 2011. Determinación de los requerimientos para la potabilización del agua de la microcuenca Santa Inés, Francisco Morazán, Honduras. Honduras. 23 p.
27. Alarcón T. JC. Determinación de las dosis óptimas del coagulante y floculante Hidroxicloruro de aluminio en función de la turbiedad y el color para la potabilización del Rio Guayas [Internet]. [Ecuador, Sede Guayaquil]: Universidad Politécnica Salesiana; 2023. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/26152>

28. Vallejos G, Cortés P. Estudio de la dinámica de sedimentación de lodos mediante un sistema óptico. 2008
29. Infante C. Criterios y tecnologías de remediación en suelos contaminados con hidrocarburos. 2021.

ANEXOS

1. Mapa de muestreo de suelo contaminado del Incidente Ambiental del km 88 + 180 Oleoducto Corriente- Saramuro



2. Mapa satelital del Incidente Ambiental km 88 + 180 Oleoducto Corriente-Saramuro.



3. Galería de imágenes de desarrollo del proyecto

Imagen 01. Extracción de muestra de lodo del Incidente Ambiental km 88+180 Oleoducto Corriente- Saramuro.



Imagen 02. Homogenización y pesado de muestra (lodo contaminado) en el laboratorio para su respectivo análisis físico y química en el km 88 + 180 Oleoducto Corriente- Saramuro.



Imagen 03. Rotulado de las muestras de lodo contaminado en el laboratorio del km 88 + 180 Oleoducto Corriente - Saramuro.



Imagen 04. Dosificación de las muestras de lodo contaminado en el laboratorio del km 88 + 180 Oleoducto Corriente- Saramuro.

