

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y TEXTIL



TESIS

**“APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS DE SANDÍA (CITRULLUS LANATUS L.),
RECUPERACIÓN DEL ACEITE DE SEMILLA Y MESOCARPIO COMO
ADSORBENTE DE PLOMO”**

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO QUÍMICO

ELABORADO POR

JEFRY NEISER FARRO LÉVANO

ID 0009-0002-4696-2147

ASESOR

Ing. ENRIQUE FILIBERTO NEIRA MONTOYA

ID 0000-0002-7288-8729

LIMA – PERÚ

2025

Citar/How to cite	Farro Lévano [1]
Referencia/Reference	[1] J. Farro Lévano, " <i>Aprovechamiento de residuos de sandía (Citrullus Lanatus L.), recuperación del aceite de semilla y mesocarpio como adsorbente de plomo</i> " [Tesis de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2025.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

Citar/How to cite	(Farro, 2025)
Referencia/Reference	Farro, J. (2025). <i>Aprovechamiento de residuos de sandía (Citrullus Lanatus L.), recuperación del aceite de semilla y mesocarpio como adsorbente de plomo</i> . [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Dedicatoria

A mis padres,

Rita Lévano y Neiser Farro,

A ustedes, que con mil formas de amor y sacrificio me apoyaron y creyeron en mí.

*Esta tesis más allá de ser un logro académico,
es la huella de todo lo que hemos superado juntos.*

A mis hermanos,

Gianmarco y Nayeli,

por su apoyo incondicional,

incluso cuando solo podían darme una palabra de aliento.

*Gracias por estar presentes, les dejo este logro como muestra de que todo es
posible cuando uno cree en sí mismo y lucha por sus sueños.*

Agradecimientos

Agradezco profundamente a mi asesor, Ing. Enrique Filiberto Neira Montoya por el compromiso de acompañarme y guiarme en este camino hacia mi titulación.

A la Ing. Luz Andrea Belén Canches Gamarra, por su compañerismo y contribuir con entusiasmo y esfuerzo a que este proyecto sea una experiencia productiva y enriquecedora.

De igual manera deseo expresar mi más cordial agradecimiento al personal técnico de la Facultad de Ingeniería Química y Textil, por su invaluable ayuda y predisposición para facilitar el acceso a las instalaciones que administran.

Resumen

Este estudio tiene como objetivo la revalorización de subproductos de sandía (*Citrullus lanatus* L.), específicamente de la variedad local Crimson Sweet mediante la caracterización fisicoquímica del aceite de sus semillas y la evaluación del mesocarpio como bioadsorbente de plomo (Pb^{2+}) en soluciones acuosas. El aceite fue extraído mediante prensado en frío (PF) y Soxhlet (SX) utilizando hexano como solvente, y se analizó su perfil lipídico, contenido fenólico total (CFT) y capacidad antioxidante. El rendimiento de extracción fue mayor con Soxhlet ($27,70 \pm 0,56$ %) que con prensado en frío ($14,57 \pm 0,74$ %). La composición de ácidos grasos muestra que el ácido linoleico está en mayor proporción (68,42 % PF; 66,74 % SX), seguido del palmítico, oleico y esteárico. El CFT fue de $77,43 \pm 0,66$ mg EAG/100 g (PF) y $82,04 \pm 1,56$ mg EAG/100 g (SX), en cuanto a la capacidad antioxidante, la inhibición del radical DPPH alcanzó el $94,40 \pm 0,08$ % para el método Soxhlet y $54,89 \pm 0,17$ % para el extraído por prensado en frío a una concentración de 60 mg/mL.

En paralelo, se evaluó el mesocarpio como bioadsorbente para la remoción de Pb^{2+} , caracterizándolo mediante FT-IR para identificar los grupos funcionales activos. La cantidad de remoción fue determinada mediante espectroscopía de absorción atómica, evaluando los efectos del tiempo de contacto, pH, concentración inicial de Pb^{2+} y dosis de adsorbente. La cantidad máxima de adsorción se alcanzó con una concentración inicial de Pb^{2+} de 50 ppm aproximadamente, pH de 5,6 y una dosis de adsorbente de 10:1 g/L de solución, alcanzando una remoción del 97% del plomo presente inicialmente en la solución. Por lo tanto, los residuos de *Citrullus lanatus* L. emerge como una alternativa viable para la obtención de moléculas bioactivas y para la remediación ambiental de contaminantes como el plomo.

Palabras clave — Sandía, semillas, aceite, antioxidante, adsorción, plomo.

Abstract

This study aims to revalorize watermelon (*Citrullus lanatus* L.) by-products, specifically from the local Crimson Sweet variety, through the physicochemical characterization of its seed oil and the evaluation of the mesocarp as a bioadsorbent for lead (Pb^{2+}) in aqueous solutions. The oil was extracted using cold pressing (CP) and Soxhlet (SX) with hexane as the solvent, and its lipid profile, total phenolic content (TPC), and antioxidant capacity were analyzed. The extraction yield was higher with Soxhlet ($27,70 \pm 0,56$ %) than with cold pressing ($14,57 \pm 0,74$ %). The fatty acid profile showed a predominance of linoleic acid (68,42% CP; 66,74% SX), followed by palmitic, oleic, and stearic acids. The TPC was $77,43 \pm 0,66$ mg GAE/100 g (CP) and $82,04 \pm 1,56$ mg GAE/100 g (SX), while the antioxidant activity against the DPPH radical reached $94,40 \pm 0,08$ % for Soxhlet and $54,89 \pm 0,17$ % for cold-pressed oil at a concentration of 60 mg/mL.

In parallel, the mesocarp was evaluated as a bioadsorbent for the removal of Pb^{2+} , characterized by Fourier-transform infrared spectroscopy (FT-IR) to identify the active functional groups. The removal amount was determined using atomic absorption spectroscopy, evaluating the effects of contact time, pH, initial Pb^{2+} concentration, and adsorbent dosage. The maximum adsorption capacity was achieved with an initial Pb^{2+} concentration of approximately 50 ppm, a pH of 5.6, and an adsorbent dose of 10:1 g/L of solution, reaching a 97% removal of the lead initially present in the solution. Overall, *Citrullus lanatus* L. presents itself as a promising source of bioactive compounds and a sustainable alternative for the bioremediation of heavy metals.

Keywords — Watermelon, seeds, oil, antioxidant, adsorption, lead.

Tabla de Contenido

	Pág.
Resumen	v
Abstract.....	vi
Introducción	1
Capítulo I. Parte introductoria del trabajo	3
1.1 Generalidades	3
1.2 Descripción del problema de investigación	4
1.3 Objetivos del estudio.....	7
1.3.1 Objetivo general.....	7
1.3.2 Objetivos específicos	7
1.4 Antecedentes investigativos	7
Capítulo II. Marcos teórico y conceptual	12
2.1 Marco teórico	12
2.1.1 Sandía	12
2.1.2 Métodos de extracción de aceite	14
2.1.3 Métodos de caracterización	17
2.2 Marco conceptual	23
2.2.1 Ácidos grasos	23
2.2.2 Polifenoles y actividad antioxidante	25
2.2.3 Adsorción.....	28
2.2.4 Bioadsorción	29
2.2.5 Plomo	30
2.3 Marco Legal	32
Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación	33

3.1	Lugar de investigación	33
3.2	Materiales y equipos	33
3.2.1	Materiales de laboratorio	33
3.2.2	Equipos.....	33
3.3	Metodología	34
3.3.1	Recolección de materia prima.....	34
3.3.2	Limpieza y Secado.....	35
3.3.3	Extracción de aceite por solvente	35
3.3.4	Extracción de aceite mediante prensado en frío	36
3.3.5	Preparación de ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME).....	37
3.3.6	Análisis de FAME mediante cromatografía de gases.....	37
3.3.7	Determinación de compuestos fenólicos totales	38
3.3.8	Evaluación de la capacidad antioxidante mediante ensayo DPPH	39
3.3.9	Remoción de plomo (Pb+2) con mesocarpio de sandía.....	41
	Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados	43
4.1	Determinación de la pérdida de humedad en la semilla de sandía	43
4.2	Determinación de la pérdida de humedad en el mesocarpio de sandía	44
4.3	Extracción Soxhlet empleando hexano como solvente	45
4.3.1	Extracción de aceite de semilla.....	45
4.3.2	Concentración y recuperación de aceite	47
4.4	Extracción por prensado en frío	48
4.5	Rendimientos de extracción de aceite	49
4.6	Análisis de ácidos grasos en el aceite	50
4.7	Determinación de los compuestos fenólicos totales.....	55
4.8	Capacidad antioxidante del aceite mediante inhibición de radicales DPPH	58
4.9	Evaluación del mesocarpio como adsorbente de Pb ²⁺	62

4.9.1 Efecto del tiempo de contacto en la remoción de Pb^{2+}	63
4.9.2 Efecto del pH en la remoción de Pb^{2+}	65
4.9.3 Efecto de la concentración inicial de Pb^{2+} en la bioadsorción.....	68
4.9.4 Efecto del dosaje de bioadsorbente en la remoción de Pb^{2+}	70
4.10 Caracterización por FT-IR del bioadsorbente	72
Capítulo V. Proyección de Ingeniería	74
5.1 Procedimiento del proceso de bioadsorción en planta piloto	74
5.1.1 Acondicionamiento del agua contaminada.....	74
5.1.2 Preparación del bioadsorbente	74
5.1.3 Adsorción a lecho fijo.....	75
5.1.4 Manejo del efluente tratado	76
5.2 Balance de materia del proceso de bioadsorción.....	78
5.3 Especificaciones técnicas de los equipos	79
5.4 Costo de equipos.....	82
Conclusiones	84
Recomendaciones	85
Referencias bibliográficas	86
Anexos.....	95

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1: Taxonomía de la sandía (<i>Citrullus lanatus</i> L.).....	12
Tabla 2: Métodos de caracterización.....	18
Tabla 3: Composición de ácidos grasos (% p/p) en aceites de semillas de sandía	24
Tabla 4: Compuestos fenólicos totales y capacidad antioxidante de semillas de sandía.....	27
Tabla 5: Diferencias entre la adsorción física y adsorción química.....	29
Tabla 6: Soluciones estándar de ácido gálico empleadas en la curva de calibración.....	38
Tabla 7: Preparación de muestras a partir de solución stock metanólica de 250 mg/mL.....	40
Tabla 8: Ensayos de extracción de aceite por método Soxhlet	48
Tabla 9: Ensayos de extracción de aceite por prensado en frío	49
Tabla 10: Rendimientos de extracción de aceite por ambos métodos.....	49
Tabla 11: Composición de ácidos grasos para el aceite de semilla de sandía	52
Tabla 12: Datos experimentales para la curva de calibración de ácido gálico	55
Tabla 13: Contenido de polifenoles totales en el aceite de semilla de sandía	57
Tabla 14: Actividad antioxidante del aceite extraído por prensado en frío.....	59
Tabla 15: Actividad antioxidante del aceite extraído por método Soxhlet.....	60
Tabla 16: Capacidad antioxidante de los aceites por prensado en frío y Soxhlet.....	61
Tabla 17: Remoción de Pb^{2+} a diferente tiempo y dosis de adsorbente de 10 g/L.....	63
Tabla 18: Adsorción de Pb^{2+} a diferente pH y dosis de adsorbente de 10 g/L.....	65
Tabla 19: Remoción de Pb^{2+} a diferente pH y dosis de adsorbente de 10 g/L.....	66
Tabla 20: Remoción de Pb^{2+} a diferentes concentraciones iniciales.....	69
Tabla 21: Efecto del dosaje de bioadsorbente en la remoción de plomo en solución.....	70
Tabla 22: Parámetros operacionales y balance de masa en la bioadsorción por lote.....	79
Tabla 23: Especificación técnica del tanque abierto superior	80
Tabla 24: Especificación técnica del tanque de mezcla con agitador	80
Tabla 25: Especificación técnica del extractor de jugo de frutas y vegetales.....	81

Tabla 26: Especificación técnica del horno de secado	81
Tabla 27: Especificación técnica del filtro prensa manual.....	82
Tabla 28: Costo total de equipos	83

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1: Sección transversal de una sandía con sus distintas partes.....	13
Figura 2: Producción mensual de sandía en el Perú. Año: 2022 (t).....	14
Figura 3: Método de obtención de aceite por prensado en frío.....	15
Figura 4: Esquema del sistema de extracción Soxhlet	17
Figura 5: Representación esquemática de un espectrofotómetro ultravioleta.....	19
Figura 6: Esquema de cromatografía de gases (GC-FID).	20
Figura 7: Esquema del funcionamiento de un espectrómetro FT-IR.....	21
Figura 8: Esquema de un espectrofotómetro de absorción atómica	22
Figura 9: Principales compuestos fenólicos y sus estructuras.	26
Figura 10: Adsorción física (a) y adsorción química (b)	29
Figura 11: Esquema del proceso de adsorción de iones metálicos en biomasa.....	30
Figura 12: Diagrama de especiación del plomo en función del pH.	32
Figura 13: Recolección de semillas y mesocarpio de sandía.	34
Figura 14: Pérdida de humedad en la semilla de sandía en función del tiempo.	44
Figura 15: Pérdida de humedad en el mesocarpio de sandía en función del tiempo.	45
Figura 16: Equipo de extracción Soxhlet	46
Figura 17: Tiempo estimado transcurrido entre ciclos en la extracción Soxhlet.....	46
Figura 18: Concentración de aceite extraído por método Soxhlet.	47
Figura 19: Prensado en frío y recuperación de aceite.	49
Figura 20: Cromatograma de aceite extraído por prensado en frío	51
Figura 21: Cromatograma de aceite extraído por método Soxhlet.....	51
Figura 22: Curva de calibración con ácido gálico (0-300 ppm)	56
Figura 23: Curva de calibración de ácido gálico	56
Figura 24: Ensayo DPPH de aceites obtenidos por prensado en frío y Soxhlet.	58
Figura 25: Inhibición del radical DPPH frente al aceite de semilla de sandía.	61
Figura 26: Concentración de Pb^{2+} a diferente tiempo de contacto.....	64

Figura 27: Remoción de Pb^{2+} a diferente tiempo de contacto.....	64
Figura 28: Influencia del pH en la concentración de Pb^{2+}	66
Figura 29: Influencia del pH en la remoción de Pb^{2+}	67
Figura 30: Remoción de Pb^{2+} a diferentes concentraciones iniciales.	69
Figura 31: Remoción de Pb^{2+} a diferente dosificación de bioadsorbente.....	71
Figura 32: Espectros FT-IR del bioadsorbente antes y después del contacto con Pb^{2+} ...	72
Figura 33: Curva de secado del mesocarpio de sandía después de la extrusión	75
Figura 34: Diagrama de flujo del proceso	77

Introducción

Durante el procesamiento y la producción de alimentos se generan subproductos y desechos. Muchos de estos residuos contienen nutrientes valiosos que, con un manejo adecuado, pueden transformarse en productos con valor agregado. Esto no solo representa una oportunidad económica, sino que también puede aportar beneficios a la salud humana y contribuir a reducir los problemas ambientales asociados con su eliminación (de Conto et al., 2011) .

La sandía (*Citrullus lanatus* L.) es una fruta cultivada y comercializada a nivel mundial, valorada por su sabor dulce y refrescante, así como por su bajo contenido calórico. Sin embargo, a pesar del creciente interés en el aprovechamiento integral de los alimentos, las investigaciones sobre los posibles efectos biológicos y aplicaciones funcionales de sus partes menos utilizadas aún son limitadas. Por ello, resulta relevante explorar el potencial que presentan estos subproductos, no solo para contribuir al cuidado de la salud y del ambiente, sino también para fomentar un enfoque más sostenible y consciente en su manejo y valorización (Neglo et al., 2021).

Si bien en algunas regiones de Asia y Medio Oriente las semillas de sandía se utilizan como bocadillos o para la elaboración de harina (Hu, 2005) y las cáscaras ocasionalmente se encurten o se cocinan ocasionalmente como verdura (Gusmini & Wehner, 2004), en la mayoría de casos estos subproductos son descartados, generando grandes volúmenes de residuos que rara vez son aprovechados de forma integral. Las semillas de sandía, por ejemplo, presentan un contenido de aceite que varía entre el 10% y 35%, dependiendo de la variedad y genotipo (Mahla et al., 2018). El aceite de semilla de sandía se considera una buena fuente de ácidos grasos esenciales, carotenoides, tocoferoles, flavonoides, vitaminas del complejo B y otros compuestos fenólicos, cuyas

cantidades presentes varían entre variedades y los métodos de extracción del aceite (Ouassor et al., 2020). Además, destaca por sus propiedades bioactivas, entre ellas, actividades antioxidantes, antiinflamatorias, cardioprotectoras y antimicrobianas (Petchsomrit et al., 2020). Por lo tanto, el aceite de semilla de sandía podría representar una fuente vegetal alternativa prometedora, tanto en consumo humano como para aplicaciones en industria cosmética y farmacéutica.

La cáscara y el mesocarpio de la sandía constituyen otros recursos frecuentemente no aprovechados, a pesar de su contenido significativo de carbohidratos, fibra, cera y otros compuestos estructurales (El-Adawy & Taka, 2001). La corteza de esta fruta se compone de pectina, celulosa, citrulina, proteína y carotenoides (Siew et al., 2007). En particular, el mesocarpio de la sandía destaca por ser una fuente natural rica en citrulina, un aminoácido no esencial que contiene grupos funcionales carboxilo y amino, los cuales le confieren una notable capacidad para captar iones de metales pesados presentes en soluciones acuosas (Agnes & Penelope, 2005). Una de las problemáticas ambientales más relevantes es la contaminación por metales pesados en medios acuosos, atribuible principalmente a su elevada toxicidad, escasa biodegradabilidad y persistencia en el medio. Como solución, los residuos de la agroindustria han ganado atención como biosorbentes, siendo promocionados por su rentabilidad, origen renovable, inocuidad y gran accesibilidad.

Este trabajo de investigación busca valorizar los residuos de sandía, específicamente la semilla y el mesocarpio. Para ello, se evaluará la capacidad antioxidante, el contenido de compuestos fenólicos y el análisis de su perfil de ácidos grasos extraído de las semillas. Asimismo, se evaluará un bioadsorbente a partir del mesocarpio, con el objetivo de analizar su eficacia en la remoción de plomo en solución acuosa.

Capítulo I. Parte introductoria del trabajo

1.1 Generalidades

A nivel mundial, la producción anual de sandía (*Citrullus lanatus* L.) ha pasado de 77,5 millones de toneladas (Mt) en el 2001 a 105 Mt en 2023. China lidera la producción mundial de sandía con 63 Mt, representando el 60,82% del total mundial. (FAO, 2023). En el Perú, la sandía es una fruta cultivada en temporadas de primavera y verano y es de importancia económica para pequeños y medianos productores que son considerados de bajos recursos. En el año 2022, la superficie cosechada de sandía en el país fue de 4103 hectáreas (ha), con un rendimiento promedio de 27,48 t ha⁻¹ (MINAGRI, 2022).

La sandía (*Citrullus lanatus* L.) es una de las preferidas por el público peruano, no solo por su sabor refrescante y alto contenido de agua, sino también por su valioso aporte nutricional. Esta fruta contiene una variedad de nutrientes como carbohidratos, fibra, proteínas grasas y minerales, los cuales se encuentran presentes en la corteza, pulpa y semillas (Fila et al., 2013). Destaca por su elevada concentración de licopeno, compuestos fenólicos y citrulina, los cuales son compuestos bioactivos con propiedades antioxidantes, de gran interés tanto para la salud humana como para aplicaciones en la industria alimentaria y farmacéutica (Cheol-Hyum et al., 2014).

En el Perú, el Instituto Nacional de Calidad (INACAL), fomenta el consumo de frutas de temporada y a su vez que cumplan los estándares mínimos de calidad. Para ello, se ha establecido la Norma Técnica Peruana "NTP 011.017:2015 FRUTAS FRESCAS. Sandías. Requisitos" la cual busca garantizar que este producto cumpla con los criterios de calidad, inocuidad y sea apto para el consumo humano (INACAL, 2023).

1.2 Descripción del problema de investigación

En las últimas décadas, el incremento de las actividades humanas ha propiciado un volumen sin precedentes de desechos, tanto sólidos como efluentes, cuya disposición final no siempre se realiza correctamente, lo que deriva en una amenaza constante para los ecosistemas y la salud pública. Los residuos agroindustriales constituyen una fracción importante de los desechos sólidos generados. Aunque no poseen un carácter peligrosamente tóxico, su manejo inadecuado puede provocar problemas medioambientales si no son dispuestos de manera adecuada (Letechipia et al., 2023). Por ello, es fundamental implementar estrategias sostenibles para su valorización, fomentando el aprovechamiento de subproductos agroindustriales que comúnmente son descartados.

En este contexto, los residuos provenientes de la sandía (*Citrullus lanatus* L.) tales como cáscara, mesocarpio y semillas, representan una alternativa prometedora debido a su abundante generación durante las temporadas de cosecha y comercialización, especialmente en regiones agrícolas donde el cultivo de esta fruta es significativo. A pesar de su alto contenido en compuestos bioactivos y materiales con potencial de aprovechamiento, estos residuos suelen desecharse sin un tratamiento adecuado, contribuyendo a la acumulación de materia orgánica en vertederos o administradas en la alimentación para animales y compostaje (de Conto et al., 2011). Esta situación abre la posibilidad de revalorizar los residuos de sandía mediante su transformación en productos de valor agregado, lo cual no solo contribuye a la reducción del impacto ambiental, sino que también promueve una economía circular en el sector agroalimentario (El-Adawy & Taka, 2001). Entre las alternativas de aprovechamiento de estos subproductos agroindustriales se encuentran el uso de desechos procedentes del procesamiento de frutas para la producción de aceite e ingredientes funcionales, así como su aplicación como bioadsorbentes en la remoción de metales pesados en diferentes tipos de regadíos.

La semilla de sandía (*Citrullus lanatus* L.), comúnmente desechada como residuo agroindustrial, representa una fuente poco explorada y subutilizada de compuestos bioactivos de alto valor nutricional e industrial. Diversos estudios han demostrado que estas semillas poseen un contenido significativo de aceite vegetal, el cual está compuesto en su mayoría por ácidos grasos insaturados como el ácido linoleico (omega-6) y ácido oleico (omega-9), considerados esenciales para el metabolismo humano, adicionalmente vitamina E y minerales (Biswas, 2017). A pesar de estos beneficios, su potencial aún no ha sido plenamente aprovechado ni incorporado de manera significativa en la industria alimentaria, cosmética o farmacéutica. Esta poca subutilización se debe, en parte, al desconocimiento general de sus propiedades y a la falta de tecnologías apropiadas para su extracción y aprovechamiento a escala industrial (Petchsomrit et al., 2020). En ese contexto, se propone realizar el análisis de su composición polifenólica, actividad antioxidante y perfil lipídico, con el objetivo de resaltar su valor alimenticio y fomentar su aprovechamiento integral.

De igual manera, el mesocarpio de sandía (*Citrullus lanatus* L.), representa otro residuo agroindustrial generado en grandes cantidades durante el procesamiento de esta fruta. Estudios recientes han demostrado que este subproducto posee características fisicoquímicas que lo convierten en un material prometedor para aplicaciones ambientales. En particular, el mesocarpio contiene una variedad de compuestos como aminoácidos no esenciales, citrulina, carotenoides, pectina y proteínas, los cuales poseen grupos funcionales, tales como carboxilos, hidroxilos y carbonilos, capaces de interactuar y unirse selectivamente a metales pesados, facilitando su adsorción (Shakoor et al., 2018). Uno de estos metales pesados es el plomo (Pb^{2+}), cuyos iones constituyen contaminantes ambientales altamente tóxicos, estables y persistentes (Lakshmipathy & Sarada, 2015). La presencia de plomo en el ambiente, proveniente tanto de fuentes naturales como de actividades humanas, constituye actualmente un problema de alcance mundial que afecta tanto al entorno como a la salud pública. La Organización Mundial de la Salud (ONU)

establece un valor guía de 10 µg/L como límite máximo de plomo en el agua potable, debido a su alta toxicidad incluso a bajas concentraciones (World Health Organization, 2017). El continente más afectado es Asia, donde se estima que más de 120 millones de personas están expuestas a niveles de plomo por encima de lo permitido en el agua potable, le siguen América y África, con más de 48 y 24 millones de habitantes en riesgo, respectivamente (Letchipia et al., 2023). Ante esta situación, el mesocarpio de sandía representa una potencial alternativa económica y abundante para la remoción de plomo en agua. En esta investigación, se evaluará la capacidad de remoción de plomo utilizando mesocarpio de sandía bajo diferentes parámetros operativos. De igual manera, se llevará a cabo la caracterización del material con el fin de identificar y analizar los grupos funcionales implicados en la adsorción de iones Pb^{2+} .

1.3 Objetivos del estudio

1.3.1 Objetivo general

Caracterizar fisicoquímicamente el aceite de semilla de sandía (*Citrullus lanatus* L.) y evaluar la capacidad de remoción de Pb^{2+} en solución acuosa empleando el mesocarpio como bioadsorbente.

1.3.2 Objetivos específicos

- Evaluar el rendimiento en la extracción del aceite de semilla de sandía por los métodos de prensado en frío y Soxhlet empleando hexano como solvente.
- Caracterizar el aceite de semilla de sandía y evaluar la influencia de los métodos de extracción sobre la composición de ácidos grasos, el contenido fenólico total y la capacidad antioxidante.
- Evaluar la capacidad del mesocarpio de *Citrullus lanatus* L. como bioadsorbente en la remoción de Pb^{2+} presentes en soluciones acuosas, mediante el análisis de parámetros como el tiempo de contacto, el pH, la concentración inicial de plomo y la dosis del adsorbente.

1.4 Antecedentes investigativos

En los estudios de Ouassor et al. (2020), evaluaron técnicas de procesos de extracción de aceites de semilla de dos variedades de *Citrullus lanatus* L. originarias de Marruecos. Los métodos fueron: prensa en frío, Soxhlet y por ultrasonido utilizando n-hexano. La extracción mediante Soxhlet se realizó empleando n-hexano como disolvente, a 80 °C durante 2 horas. Se comparó las composiciones de ácidos grasos teniendo como principales valiosos al ácido linoleico, oleico, palmítico y presencia de ácido linolénico; también la composición de fitoesteros y tocoferoles. Los aceites de semillas analizados mostraron una cantidad significativa de compuestos fenólicos totales de hasta 51,1% y una buena inhibición de los radicales DPPH de 84,8%. Las variables por controlar fueron los

tamaños de partícula (300-500 mm), tiempo de extracción (10 y 20 minutos), relaciones solvente y gramos de semilla.

Por otro lado, Petchsomrit et al. (2020), compararon la actividad antioxidante entre las semillas y la cera de sandía en donde ambas son ricas en ácidos grasos aprovechándose estos en formulaciones cosmecéuticas. La extracción de la cera de sandía se extrajo con solvente a 60°. Los ácidos grasos fueron analizados mediante cromatografía, entre ellos el ácido araquídico donde su proporción fue de $40,96 \pm 2,27\%$, ácido palmítico de $28,42 \pm 3,30\%$ y el ácido linoleico del $15,86 \pm 0,77\%$. La actividad antioxidante de la cera fue determinada a través de su capacidad para neutralizar radicales DPPH, se tuvo el valor de 0,036 mg de α -tocoferol/g de cáscara seca para la cera extraída de la cáscara de sandía.

En la investigación por Raziq et al. (2012), caracterizaron cuatro variedades de semillas de sandía en Pakistán. El aceite de semilla fue extraído en un extractor Soxhlet con n-hexano en baño maría por 6h con un rendimiento entre el 28,25 y 35,65%. Además, de la torta de semillas oleaginosas analizaron el contenido de proteína, fibra y cenizas. Las características fisicoquímicas estudiadas fueron: índice de yodo, índice de saponificación, insaponificable, ácidos grasos, índice de refracción y densidad.

En el estudio de Costa et al. (2011), compararon la caracterización del aceite de semilla de sandía mediante el proceso mecánico por expulsor y método Soxhlet con hexano como solvente, los rendimientos de extracción fueron de 21,64% y 32,16%, respectivamente. Con relación a los ácidos grasos, obtuvieron predominancia del ácido palmítico (10,06%), ácido oleico (16,08%) y ácido linoleico (65,61%) y ácido linolénico (0,18%) lo que lleva a reflexionar al autor que el aceite de sandía extraído podría ser adecuado para el área culinaria en la fabricación de margarinas y al untar en ensaladas.

En comparación de los dos métodos de extracción, la extracción por expulsor generó un aceite con mayor calidad en estabilidad oxidativa que se determinó mediante AOCS.

De acuerdo con Torres et al. (2017), identificaron los ácidos grasos y compuestos fenólicos del aceite de semilla de la planta *Ulex europaeus*. La extracción de la muestra oleosa fue por micro extracción con hexano con un rendimiento de 7,33%. En la determinación de compuestos fenólicos, se diluyó 50 mg de aceite en cloroformo y se agregó el reactivo BSTFA durante 12 h de reacción, quedando lista análisis por espectrometría de masas. Los ácidos grasos imperantes fueron; linoleico (60,48%), oleico (18,18%) y palmítico (5,8%). También se aprecia la presencia de dos especies de tocoferoles como el β -tocoferol (1,02%) y α -tocoferol (0,65%); lo cual nos da muestra de la actividad antioxidante que posee las semillas de *Ulex europaeus*.

En la investigación realizada por Letechipia et al. (2023) produjeron un biosorbente a partir de residuos de cáscara de sandía y un biosorbente en tratamiento con ácido cítrico para evaluar el potencial de remoción de arsénico en aguas subterráneas. Se empleó ácido cítrico para aprovechar sus propiedades quelantes a bajo pH. El biosorbente natural fue tamizado hasta 0,710 mm. El biosorbente tratado, es producto de la mezcla de 50 g del biosorbente natural con 600 mL de ácido cítrico 0,5 M a diferentes temperaturas. Para evaluar la capacidad de remoción de los biosorbentes se empleó muestras de 20 mL de agua subterránea a diferentes concentraciones (0, 1, 13, 22 y 65 $\mu\text{g/L}$) con 0,5 g de biosorbente, agitados durante 2 y 4 h para ser centrifugados a 4000 rpm por 10 min y con el filtrado determinar la concentración de arsénico final mediante espectroscopia de absorción atómica. Se consideró como variables la concentración y el tiempo de reacción. Además, se realizó un análisis de microscopía SEM para comparar su morfología de ambos biosorbentes. Durante la experimentación, el pH se mantuvo entre 5,5 y 7,5. El mayor porcentaje de remoción (99,99%) se presentó en ambos biosorbentes a las 4 h de reacción. El biosorbente natural tuvo la mayor capacidad de adsorción (2,42 $\mu\text{g/g}$) a concentración

de 65 µg/L de arsénico. Según la microscopía SEM realizada, el biosorbente natural presentó poros circulares, mientras que para el biosorbente tratado, presentó poros más poligonales. Se concluye que, a mayor tiempo de reacción, mayor es la capacidad de remoción del biosorbente.

En los estudios de Lakshmipathy et al. (2013) removieron iones Ni^{2+} y Co^{2+} de una solución acuosa empleando cáscara de sandía como sorbente natural. En la preparación del biosorbente, se empleó cáscara de sandía seca tamizada con malla 100; mientras que, las soluciones madre de Ni^{2+} y Co^{2+} se prepararon disolviendo las sales y en dilución hasta la concentración de metal deseada. Los ajustes en el pH se realizaron empleando soluciones de HCl 0,1 M y NaOH 0,1M. La concentración de los metales retenidos por el biosorbente se determinó mediante espectrofotometría de absorción atómica y para la identificación de los grupos y moléculas funcionales que facilitan la absorción de los iones metálicos en la cáscara de sandía se utilizó FT-IR. Las variables en estudio fueron el pH, la dosis de adsorbente, el tiempo de contacto y la concentración inicial de iones metálicos. Los resultados mostraron que la cáscara de sandía presentó una capacidad máxima de sorción de 35,3 y 23,3 mg para los iones Ni^{2+} y Co^{2+} , respectivamente.

En la investigación presentada por Wanja et al. (2016) evaluaron la cinética y eficiencia del biosorbente a partir de cáscara de sandía en tratamiento químico para adsorción de Cu, Pb y Cd. Para ello, las cáscaras de sandía se secaron a 105 °C y el triturado se mezcló con ácido sulfúrico 1N en proporción 1:2 (peso: volumen) a 150 °C por 24 h, donde posteriormente se agrega en solución de bicarbonato de sodio para eliminar el residuo ácido. El análisis de los grupos funcionales presentes en la cáscara de sandía tratada y sin tratamiento se realizó mediante espectros MIR en el rango 600 a 4000 cm^{-1} . La morfología de los biosorbentes se determinaron empleando SEM. Las soluciones madre de Cu^{2+} , Pb^{2+} y Cd^{2+} se prepararon a partir de sus nitratos metálicos en dilución progresiva y se colocaron 50 mL de estas soluciones acuosas con los biosorbentes tratados y sin

tratamiento en agitación magnética. Las variables evaluadas fueron la concentración inicial, tiempo de contacto, pH de la solución y dosis de adsorción. El equilibrio de la biosorción fue modelado según la ecuación de Langmuir con capacidades máximas de adsorción para Cu^{2+} , Pb^{2+} y Cd^{2+} de 134,23 mg/g, 130,23 mg/g y 97,149 mg/g, respectivamente. La cinética en la adsorción fue de pseudosegundo orden y se registraron eficiencias de desorción de 99,79% para el ion Cu^{2+} , 94,98% para el Pb^{2+} y 99,23% para Cd^{2+} en las cáscaras de sandía modificadas.

Capítulo II. Marcos teórico y conceptual

2.1 Marco teórico

2.1.1 Sandía

2.1.1.1 Origen y taxonomía

La sandía (*Citrullus lanatus* L.), perteneciente a la familia de las Cucurbitaceae, es originaria de regiones semi desérticas de África tropical, el cultivo y su extensión se dio en países de Asia y Europa, donde los habitantes europeos trajeron esta fruta hasta América. En la actualidad, es una de las frutas más consumidas en el mundo y los principales países productores son: China, India, Turquía, Argelia y Brasil (Casaca, 2005).

Tabla 1:

Taxonomía de la sandía (Citrullus lanatus L.)

Categoría	Clasificación
Reino	Plantae
División	Magnoliophyta
Clase	Magnoliopsida
Orden	Cucurbitales
Familia	Cucurbitaceae
Género	Citrullus
Especie	Citrullus lanatus (Thunb).

Nota: Adaptado de (Biswas et al., 2017)

2.1.1.2 Variedades de sandía

Existen alrededor de más de 1200 variedades de sandía cultivadas en todo el mundo. De estas, entre 200 a 300 variedades se cultivan de manera comercial. (Zohary et al., 2012). Las variedades de sandía se pueden clasificar en función a sus características como el color, la forma y el tamaño del futo. Con respecto a las variedades comerciales, existen numerosas. Algunas de las más conocidas incluyen: Crimson Sweet, Sugar Baby,

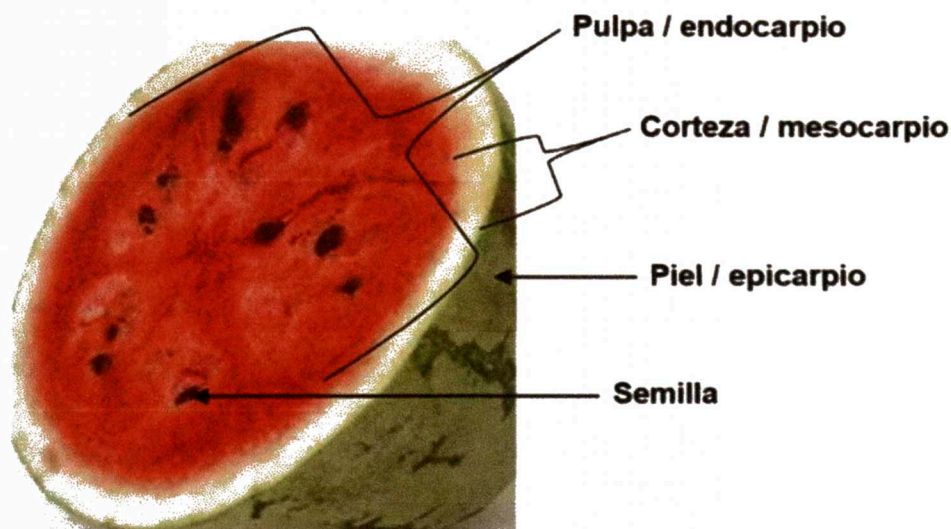
Charleston Gray, Jubile, Black Diamond, entre otras (Dirección General de Tecnología Agraria, 2002).

2.1.1.3 Composición de la sandía

La sandía (*Citrullus lanatus* L.) se compone principalmente de tres partes: pulpa, semilla y cáscara (mesocarpio y epicarpio). En promedio, la fruta está constituida por un 68% de pulpa, 30% de cáscara y un 2% de semillas, en relación con el peso total (Bellary et al., 2016). Su composición química está constituida principalmente por un 93% de agua, 6% de carbohidratos, 0,6% de proteínas, 0,2% de grasas, además de contener vitaminas, minerales y compuestos bioactivos como el licopeno (Feizy et al., 2020).

Figura 1:

Sección transversal de una sandía con sus distintas partes



Nota: Adaptado de (Neglo et al., 2021).

2.1.1.4 Producción de sandía en el Perú

La sandía es una fruta estacional cultivada principalmente durante la primavera y el verano en las regiones de la costa y selva del Perú, donde constituye una actividad agrícola de importancia económica para pequeños y medianos productores. En el 2022, se registraron 4 342 hectáreas sembradas a nivel nacional y 4 103 hectáreas cosechadas, lo

que resultó en una producción total de 112 747 toneladas, con un rendimiento promedio de 27 481 kg/ha (MINAGRI, 2022). De acuerdo con la Figura 2, la producción mensual de sandía en Perú durante el 2022 mostró una alta estacionalidad. El nivel más bajo se registró en mayo con 3,63 mil toneladas, mientras que el máximo ocurrió en diciembre con 21,35 mil toneladas, evidenciando una marcada concentración de la producción hacia fin de año.

Figura 2:

Producción mensual de sandía en el Perú. Año: 2022 (t).



Nota: Adaptado de (MINAGRI, 2022).

2.1.2 Métodos de extracción de aceite

Existen varios métodos de extracción y la selección adecuada de alguno dependerá en gran medida del costo del proceso, la disponibilidad, las propiedades del material a extraer, preocupaciones ambientales y otros. A continuación, se describen métodos convencionales de extracción comúnmente empleados en matrices oleaginosas.

2.1.2.1 Prensado en frío

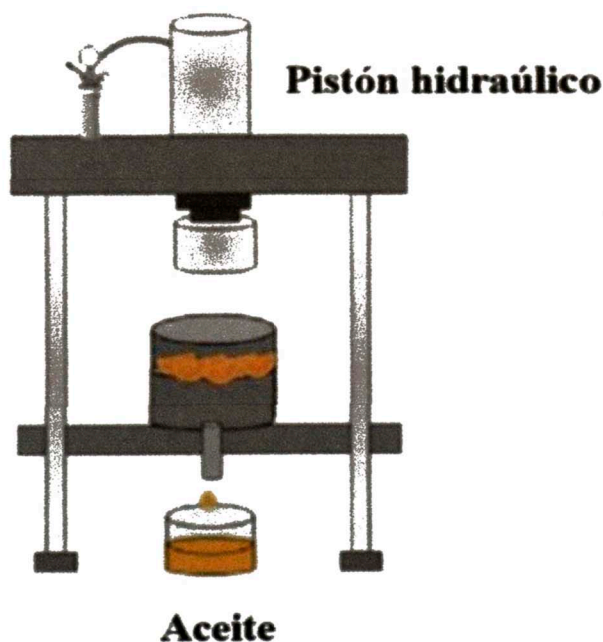
El prensado en frío es un método de extracción mecánica ampliamente utilizado para obtener aceites vegetales a partir de semillas oleaginosas y otras matrices vegetales.

A diferencia de los métodos convencionales que emplean disolventes orgánicos o temperaturas elevadas, el prensado en frío se caracteriza por operar a bajas temperaturas, sin necesidad de procesos químicos o térmicos, lo que lo convierte en una técnica respetuosa con el medio ambiente y segura para la salud (Çakaloğlu et al., 2018)

La extracción por prensado en frío implica exprimir las semillas mecánicamente para extraer el aceite de las materias primas. Para emplear esta técnica, las semillas oleaginosas deben estar muy limpias, uniformes y tener un nivel de humedad adecuado para ser procesadas. Según Costa et al. (2011), recomienda emplear la extracción por prensado en frío en biomasas con alta presencia de fibra con un contenido de aceite que supere el 20% de tal manera de preservar algunos compuestos que podrían ser degradados en el proceso de extracción por solventes.

Figura 3:

Método de obtención de aceite por prensado en frío



Nota: Adaptado de (Prestes et al., 2023).

La técnica de prensado en frío puede llegar a producir aceites vírgenes muy puros y pueden consumirse de manera directa. Sin embargo, el rendimiento del aceite suele ser

menor comparado a la extracción por disolventes y prensado en caliente; es por ello, que se recomienda aplicar algunos tratamientos previos a las semillas antes del prensado, por ejemplo, aplicación de enzimas, microondas, cocción al vapor, tostado previo, entre otros (Aydeniz et al., 2014). Algunos estudios demuestran que el tratamiento con microondas de las semillas de colza antes del prensado en frío mejora el rendimiento de aceite, el contenido de fitoesterol, tocoferol y la estabilidad oxidativa (Azadmard et al., 2010).

2.1.2.2 Extracción con solventes

Los solventes orgánicos se emplean de manera habitual para extraer los lípidos de las semillas oleaginosas. La extracción por solventes, por lo general, tiene un mayor rendimiento de extracción. Los solventes más comunes utilizados son: hexano, tolueno, éter de petróleo, diclorometano, entre otros (de Conto et al., 2011)

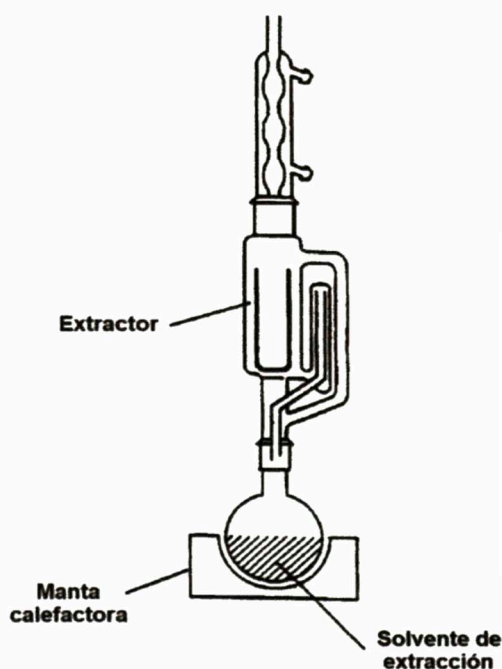
Algunos solventes empleados como el hexano pueden ser fácilmente recuperado y reutilizado; donde a un largo plazo el costo del proceso es económico. Además del aceite, la extracción por solventes permite recuperar otros componentes valiosos, tales como proteínas y fibras, sin embargo, existe una posibilidad de degradar térmicamente los ácidos grasos insaturados y los compuestos funcionales, dependiendo de las condiciones de extracción empleadas y la necesidad de eliminar residuos de semillas oleaginosas (Costa et al., 2011).

Una de las técnicas que emplea solventes orgánicos es la extracción Soxhlet, un método clásico y ampliamente utilizado para la obtención de compuestos lipídicos a partir de matrices sólidas, suelos y tejidos biológicos. Este proceso consiste en colocar la muestra en un cartucho o dedal, el cual es sometido a un ciclo continuo de extracción: el disolvente se calienta, se condensa, atraviesa la muestra y retorna al matraz de ebullición mediante un sistema de sifón, arrastrando los compuestos deseados. A pesar de ser considerada una técnica tradicional, la extracción Soxhlet sigue siendo altamente eficaz

debido a su capacidad para realizar una extracción exhaustiva, especialmente cuando se emplean solventes como hexano, tolueno o diclorometano. Sin embargo, entre sus principales desventajas se encuentran el elevado consumo de solventes y el largo tiempo requerido para completar el proceso (Luque de Castro & García Ayuso, 2000).

Figura 4:

Esquema del sistema de extracción Soxhlet



Nota: Tomado de (Luque de Castro & García Ayuso, 2000).

2.1.3 Métodos de caracterización

En la actualidad, existen múltiples técnicas analíticas de carácter físico, químico y mecánico que permiten caracterizar materiales desde distintos enfoques. Estas metodologías se utilizan para identificar elementos, grupos funcionales, compuestos específicos o incluso para analizar la estructura superficial de las sustancias. La elección del método depende del tipo de información que se desea obtener, así como de la naturaleza de la muestra.

Tabla 2:**Métodos de caracterización**

Método	Tipo de técnica	Aplicación principal	Ejemplos de uso
Espectroscopía UV-Vis	Espectroscópica	Cuantificación de compuestos con cromóforos	Análisis de pigmentos, antioxidantes
Cromatografía de gases con detección por ionización de llama (GC-FID)	Cromatográfica	Identificación y cuantificación de compuestos orgánicos volátiles	Detección de alcoholes, hidrocarburos, solventes
Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FT-IR)	Espectroscópica (infrarroja)	Identificación de grupos funcionales	Detección de enlaces funcionales en moléculas orgánicas
Espectroscopía de Absorción Atómica (AAS)	Espectroscópica atómica	Cuantificación de metales en muestras	Análisis de trazas metálicas en agua o alimentos

Nota: Adaptación en resumen de (Ibáñez Moreno et al., 2021).

2.1.3.1 Espectroscopía de UV-Visible

La espectroscopía UV-Visible es una técnica analítica que permite estudiar la interacción entre la radiación electromagnética y las moléculas, enfocándose en las transiciones electrónicas que ocurren cuando un electrón es promovido desde un nivel de energía más bajo a uno más alto. Estas transiciones son características de compuestos que poseen sistemas de electrones π conjugados, ya que dichos sistemas absorben energía en el rango de longitudes de onda entre 200 y 800 nm. En este intervalo, la región visible del espectro se extiende de 400 a 800 nm, mientras que la región ultravioleta se ubica entre 200 y 400 nm. Cuando una sustancia absorbe radiación en esta región, sus electrones pueden ser promovidos desde niveles de energía más bajos a niveles más altos. Este fenómeno depende de la estructura electrónica del compuesto y de la presencia de sistemas de electrones π o pares de electrones no enlazantes; las transiciones electrónicas más comunes incluyen $\pi \rightarrow \pi^*$, $n \rightarrow \pi^*$, y $n \rightarrow \sigma^*$, siendo las primeras dos las más relevantes en compuestos orgánicos con cromóforos (Carey, 2008).

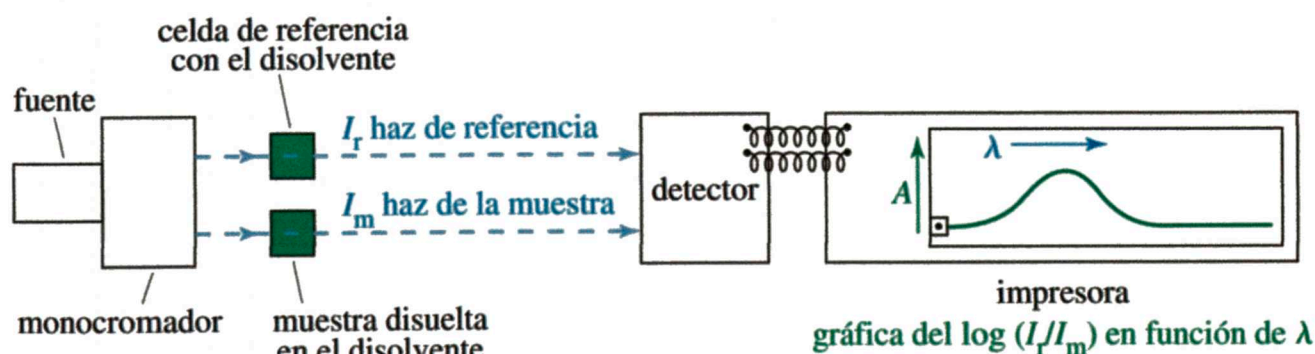
El proceso de absorción de una sustancia puede evaluarse aplicando la ley de Beer-Lambert, la cual describe una relación proporcional entre la absorbancia y la concentración de dicha sustancia en solución. Esta relación se expresa matemáticamente según la Ecuación 1:

$$A = \epsilon \cdot b \cdot c \quad (1)$$

Donde A representa la absorbancia, ϵ es la absorbitividad molar ($\text{L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$), b es la longitud del recorrido de la luz a través de la muestra (cm) y c es la concentración del analito (mol/L) (Yurkanis, 2007).

Figura 5:

Representación esquemática de un espectrofotómetro ultravioleta



Nota: La radiación atraviesa un monocromador y se separa en dos haces, de los cuales uno incide sobre la muestra y el otro sobre la referencia. El detector compara sus intensidades y genera una gráfica de absorbancia frente a la longitud de onda. Tomado de (L.G. Wade, 2011).

2.1.3.2 Cromatografía de gases con detector FID

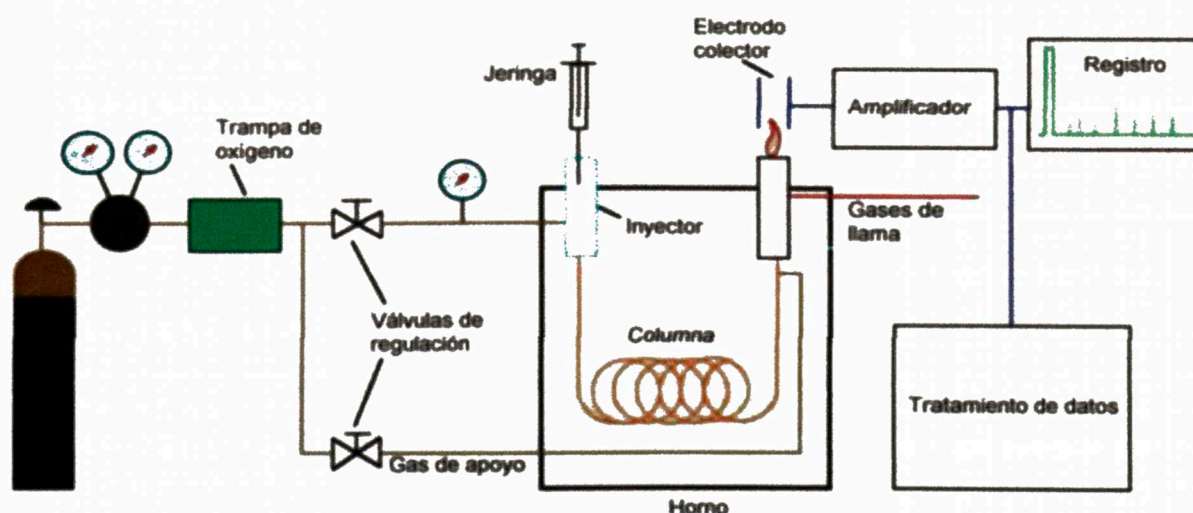
La cromatografía de gases acoplada a un detector de ionización de llama (GC-FID) es una técnica analítica ampliamente utilizada para la separación y análisis de compuestos orgánicos volátiles y termoestables. Esta metodología se fundamenta en la interacción diferencial que tienen los constituyentes de una muestra en interacción con una fase estacionaria dentro de una columna, mientras son arrastrados por un gas inerte. En el detector de ionización de llama (FID), los analitos que eluyen de la columna son quemados en una llama de hidrógeno y aire, lo que provoca la formación de iones y electrones a partir

de los fragmentos orgánicos, generando una corriente eléctrica proporcional a la cantidad de compuesto presente. Estos iones son recolectados por un electrodo sometido a una diferencia de potencial, generando una señal eléctrica directamente proporcional a la cantidad de carbono presente en los compuestos analizados (Tissot et al., 2012)

Este detector es ampliamente reconocido por su capacidad de respuesta frente a una gran variedad de compuestos orgánicos, especialmente aquellos que contienen enlaces C-H. Se caracteriza por su alta sensibilidad, bajo nivel de ruido, excelente linealidad en la respuesta y una operación estable, lo que lo convierte en una herramienta confiable en laboratorios de análisis instrumental. Una de sus ventajas analíticas es que presenta una baja o nula respuesta ante compuestos inorgánicos como el agua, el dióxido de carbono o el amoníaco, lo cual minimiza las interferencias durante la detección y mejora la selectividad hacia los compuestos de interés (Poole, 2015).

Figura 6:

Esquema de cromatografía de gases (GC-FID).



Nota: La muestra se inyecta mediante una jeringa en el sistema, donde es vaporizada y arrastrada por un gas portador. Posteriormente atraviesa una columna ubicada en un horno, en la cual se lleva a cabo la separación de los compuestos. A la salida de la columna, los analitos son ionizados en una llama de hidrógeno/aire y detectados por un electrodo colector. La señal obtenida es amplificada y registrada para su análisis y procesamiento. Tomado de (Sánchez Medina & Huerta Greco, 2012).

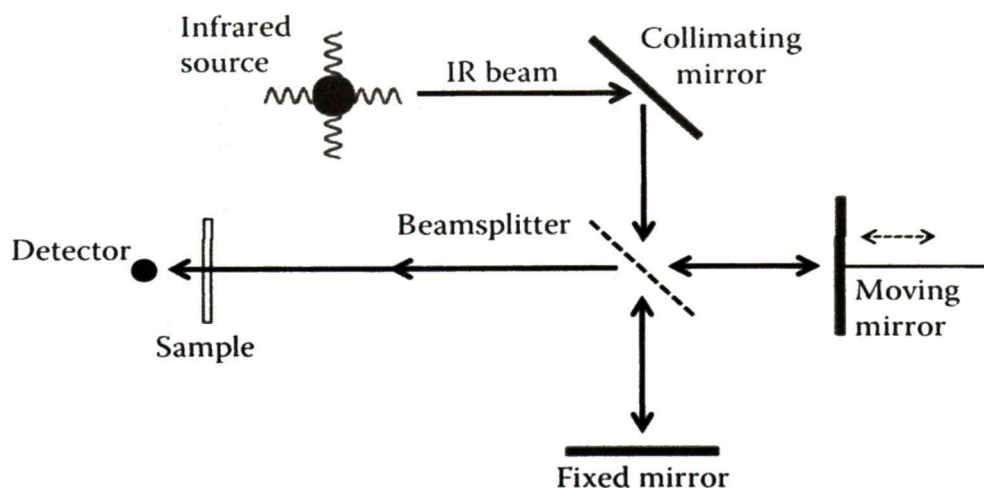
2.1.3.3 Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FT-IR)

La espectroscopía FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) es una técnica instrumental ampliamente utilizada en el análisis químico y físico de materiales, cuya finalidad principal es identificar grupos funcionales presentes en una sustancia mediante la interacción de la radiación infrarroja con la materia (Wade, 2011).

La espectroscopía FTIR se diferencia de la espectroscopía infrarroja tradicional en la forma en que se recoge la información. En lugar de analizar cada longitud de onda de forma individual, como ocurre en los espectrofotómetros dispersivos, la técnica FTIR utiliza un interferómetro para registrar simultáneamente todas las frecuencias del espectro. El interferograma contiene toda la información espectral codificada en función del tiempo o de la posición del espejo móvil. A través de una transformada matemática conocida como transformada de Fourier, este patrón se convierte en un espectro que representa la absorbancia o transmitancia en función del número de onda (Smith, 2011).

Figura 7:

Esquema del funcionamiento de un espectrómetro FT-IR



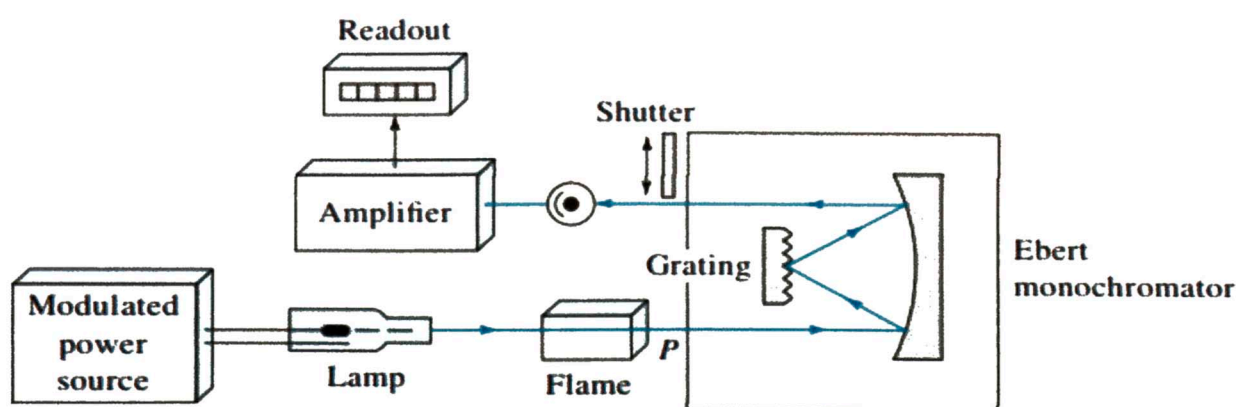
Nota: Un haz infrarrojo se divide y se refleja hacia un espejo fijo y otro móvil. Al recombinarse, el haz atraviesa la muestra antes de llegar al detector. El movimiento del espejo móvil genera un interferograma, que se transforma en un espectro mediante la Transformada de Fourier. Tomado de (Smith, 2011).

2.1.3.4 Espectroscopía de absorción atómica (AAS)

La espectroscopía de absorción atómica (AAS) es una técnica instrumental ampliamente utilizada para la determinación cuantitativa de elementos metálicos en distintos tipos de muestras (Skoog et al., 2007). Su fundamento radica en la capacidad que poseen los átomos en estado fundamental y en fase gaseosa para absorber radiación electromagnética en longitudes de onda específicas, correspondiente a transiciones electrónicas entre niveles de energía definidos. Al introducir una muestra con el elemento de interés en una fuente de atomización, como una llama o un horno de grafito, los compuestos se disocian dando lugar a átomos libres. Los átomos generados son capaces de absorber la radiación proveniente de una lámpara de cátodo hueco, dispositivo diseñado para emitir luz en longitudes de onda específicas del elemento en estudio. La energía absorbida corresponde a las transiciones electrónicas hacia niveles excitados específicos. La ley de Beer-Lambert (Ecuación 1) describe la relación directa entre la concentración del analito en la muestra y la cantidad de radiación absorbida (Skoog et al., 2007).

Figura 8:

Esquema de un espectrofotómetro de absorción atómica



Nota: La lámpara emite luz específica que atraviesa la llama, donde los átomos de la muestra absorben parte de esa radiación. El monocromador selecciona la longitud de onda deseada y el detector mide la señal absorbida, que se relaciona con la concentración del elemento analizado. Tomado de (Skoog et al., 2007).

2.2 Marco conceptual

2.2.1 Ácidos grasos

Los ácidos grasos son ácidos carboxílicos de cadena larga, compuestos por un grupo funcional carboxilo ($-\text{COOH}$) y una extensa cadena hidrocarbonada. En la naturaleza, la mayoría de los ácidos grasos están compuestos por un número par de átomos de carbono, ya que se originan a partir de la unidad de acetato en la biosíntesis de lípidos. Comúnmente, estas cadenas son lineales y varían en su grado de saturación, lo que influye directamente en sus propiedades físicas y funcionales. Desde el punto de vista estructural, los ácidos grasos pueden clasificarse en dos grandes grupos: saturados, que carecen de dobles enlaces, e insaturados, que poseen uno o más enlaces dobles carbono-carbono. Cuando hay más de un doble enlace, se les denomina ácidos grasos poliinsaturados. En los ácidos grasos de origen natural, estos enlaces dobles tienden a encontrarse en configuración *cis*, lo que provoca una torsión en la molécula que impide una alineación ordenada entre cadenas vecinas, disminuyendo así su punto de fusión (Yurkanis, 2007).

Los aceites obtenidos a partir de semillas son fuentes importantes de ácidos grasos insaturados. En el caso específico del aceite de semilla de sandía, se ha identificado que el ácido linoleico es el principal componente, con una proporción que varía entre el 45,30 % y el 51,80 % del total de ácidos grasos presentes (Raziq, 2012). Este tipo de perfil lipídico es valorado no solo por sus propiedades nutricionales, sino también por su estabilidad y funcionalidad en productos alimentarios y cosméticos.

En la Tabla 3 según los estudios de Ouassor et al. (2020), observamos las composiciones de ácidos grasos de dos variedades de aceite de semillas de sandía mediante tres métodos de extracción diferente (prensado en frío, Soxhlet y ultrasonido). El ácido linoleico tiene el porcentaje más alto para la variedad "lanatus" y extracción Soxhlet,

con un 64,43%. El mayor porcentaje de ácido oleico se obtuvieron para la variedad “citroides” y por prensado en frío, con 19,08%.

Tabla 3:

Composición de ácidos grasos (% p/p) en aceites de semillas de sandía

Ácidos grasos	Citrullus lanatus var. Lanatus			Citrullus lanatus var. Citroides		
	Prensado en frío	Soxhlet	Ultrasonido	Prensado en frío	Soxhlet	Ultrasonido
C14:0 Ácido mirístico	0,04 ± 0,01	0,04 ± 0,01	0,04 ± 0,01	0,05 ± 0,01	0,05 ± 0,01	0,05 ± 0,01
C16:0 Ácido palmítico	10,29 ± 0,35	10,28 ± 0,36	10,29 ± 0,35	10,07 ± 0,31	10,43 ± 0,33	10,29 ± 0,29
C16:1 Ácido palmitoleico	0,07 ± 0,01	0,07 ± 0,01	0,07 ± 0,01	0,1 ± 0,01	0,08 ± 0,01	0,08 ± 0,01
C17:0 Ácido margárico	0,10 ± 0,01	0,11 ± 0,01	0,10 ± 0,01	0,06 ± 0,01	0,06 ± 0,01	0,06 ± 0,01
C17:1 Ácido margaroleico	0,02 ± 0,01	0,02 ± 0,01	0,014 ± 0,01	0,01 ± 0,01	-	0,02 ± 0,01
C18:0 Ácido esteárico	6,97 ± 0,26	6,79 ± 0,22	6,97 ± 0,18	7,98 ± 0,29	8,52 ± 0,20	8,65 ± 0,20
C18:1 Ácido oleico	14,76 ± 0,80	14,75 ± 0,84	14,76 ± 0,79	19,08 ± 1,07	16,63 ± 0,94	16,65 ± 0,94
C18:2 Ácido linoleico	67,06 ± 0,95	67,43 ± 0,97	67,06 ± 0,92	61,76 ± 0,91	63,76 ± 0,92	63,74 ± 0,95
C18:3 Ácido linolénico	0,3 ± 0,05	0,16 ± 0,02	0,3 ± 0,08	0,46 ± 0,11	0,07 ± 0,01	0,06 ± 0,01
C20:0 Ácido araquídico	0,29 ± 0,09	0,27 ± 0,09	0,29 ± 0,08	0,32 ± 0,11	0,31 ± 0,10	0,32 ± 0,08
C20:1 Ácido gadoleico	0,10 ± 0,01	0,08 ± 0,01	0,10 ± 0,01	0,11 ± 0,01	0,09 ± 0,01	0,08 ± 0,01

Nota: Composiciones de ácidos grasos (% p/p) de Citrullus lanatus var. lanatus y Citrullus lanatus var. aceite de semillas de citroides. Adaptado de (Ouassor et al., 2020).

De acuerdo con el reporte, los ácidos grasos principales en la semilla de sandía son ácido linoleico, oleico y palmítico; en ese orden. También podemos encontrar al ácido esteárico, pero en baja cantidad. Los aceites con cantidades significativas de ácido linoleico y oleico son importantes en la ingesta diaria.

2.2.2 Polifenoles y actividad antioxidante

2.2.2.1 Polifenoles

Los polifenoles son compuestos orgánicos que se caracterizan por la presencia de dos o más grupos fenólicos en su estructura. Se encuentran principalmente en tejidos vegetales, donde cumplen funciones relacionadas con la defensa, pigmentación y desarrollo. Son ampliamente distribuidos en frutas, verduras, semillas, granos, hierbas y bebidas como el té o el vino. Aunque su origen principal es vegetal, también pueden estar presentes en productos fermentados o procesados derivados de plantas. Su relevancia en la salud humana radica en su actividad antioxidante, antiinflamatoria y protectora frente a diversas enfermedades crónicas (Rappoport, 2003).

2.2.2.2 Clasificación de polifenoles

Los polifenoles comprenden una amplia y diversa familia de compuestos bioactivos, cuya clasificación se basa principalmente en su estructura química, número de anillos fenólicos y elementos que los conectan. Rappoport (2003), menciona que pueden agruparse en las siguientes clases principales:

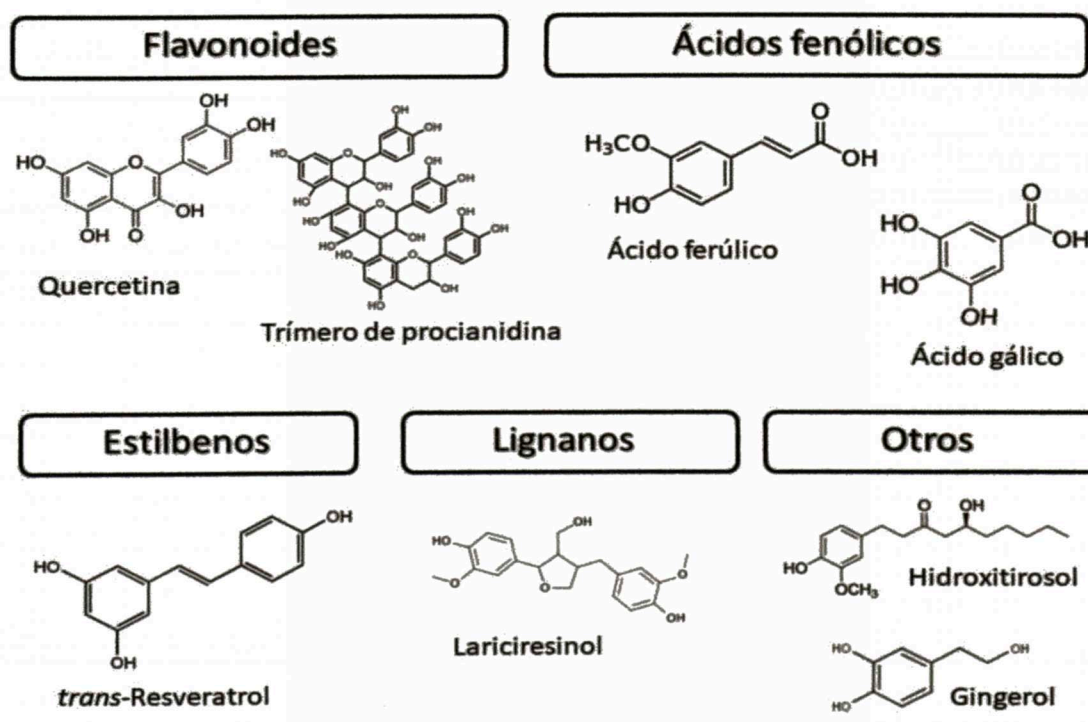
- i. **Ácidos fenólicos.** Se distinguen por la presencia de un anillo aromático enlazado a uno o varios grupos carboxilo. Se clasifican, de manera general, en dos grupos: los ácidos benzoicos, como el ácido gálico, y los ácidos cinámicos, entre los que se incluyen el ácido ferúlico y el ácido cafeico.
- ii. **Flavonoides.** Representan el grupo más abundante y diversificado de polifenoles. Su estructura básica presenta dos anillos aromáticos enlazados por una cadena de tres carbonos que puede formar un anillo central. Esta familia comprende subclases como flavonoles, flavonas, flavanonas, isoflavonas, antocianinas y catequinas.
- iii. **Lignan.** Son compuestos derivados de la unión de dos unidades fenilpropanoides. Suelen encontrarse en semillas, especialmente en la linaza,

aunque también pueden estar presentes en cereales integrales y algunas frutas y verduras.

- iv. **Estilbenos.** Se caracterizan por la presencia de dos anillos fenólicos unidos entre sí mediante un puente de etileno. El compuesto más estudiado de esta clase es el resveratrol, presente principalmente en la piel de las uvas, el vino tinto y algunos frutos secos.

Figura 9:

Principales compuestos fenólicos y sus estructuras.



Nota: Tomado de (Pérez Jiménez, 2019).

2.2.2.3 Actividad antioxidante

La actividad antioxidante hace referencia a la capacidad de ciertas sustancias para neutralizar especies reactivas del oxígeno y otros radicales libres generados tanto por procesos metabólicos como por factores externos, entre ellos la contaminación, la radiación ultravioleta y el estrés oxidativo. Estos radicales libres son moléculas inestables que, en exceso, pueden dañar lípidos, proteínas, carbohidratos y ácidos nucleicos, lo que conduce al envejecimiento celular y al desarrollo de diversas enfermedades crónicas, incluyendo

trastornos cardiovasculares, neurodegenerativos y cáncer (Moneim et al., 2022). En este sentido, los antioxidantes funcionan como protectores al ceder electrones a los radicales libres, evitando volverse inestables en el proceso, interrumpiendo así las reacciones en cadena que afectan la integridad celular. La actividad antioxidante de un compuesto puede evaluarse mediante diversos métodos in vitro, entre los que destacan el ensayo de captura del radical DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidrazilo), el método ABTS (ácido 2,2'-azino-bis(3-etilbenzotiazolina-6-sulfónico), el ORAC (capacidad de absorción de radicales de oxígeno) y el FRAP (poder reductor férrico) (Kuskoski et al., 2005).

2.2.2.4 Relación entre los polifenoles y la capacidad antioxidante

La capacidad antioxidante se entiende como el potencial de una sustancia para neutralizar radicales libres o frenar los procesos de oxidación. Los compuestos fenólicos, como los ácidos fenólicos y los flavonoides, son algunos contribuyentes a la capacidad antioxidante de las semillas de sandía. En la Tabla 4 se presentan los resultados obtenidos por Ouassor et al. (2020) de los compuestos fenólicos totales y capacidad antioxidante de los aceites de semilla extraídos de dos variedades de sandía por tres diferentes métodos de extracción.

Tabla 4:

<i>Compuestos fenólicos totales y capacidad antioxidante de semillas de sandía</i>			
Método de extracción	Aceite	Contenido fenólico total (mg EGA/100 g aceite)	Actividad antioxidante DPPH%RSA
Prensado en frío	Citrullus lanatus var. lanatus	34,0 ± 0,04	51,1 ± 0,1
	Citrullus lanatus var. citroides	77,4 ± 0,08	65,8 ± 0,08
Soxhlet	Citrullus lanatus var. lanatus	89,5 ± 0,06	82,4 ± 0,03
	Citrullus lanatus var. citroides	78,8 ± 0,02	84,8 ± 0,04
Ultrasonido	Citrullus lanatus var. lanatus	71,0 ± 0,06	55,9 ± 0,06
asistido	Citrullus lanatus var. citroides	63,3 ± 0,04	54,6 ± 0,09

Nota: Obtenido de (Ouassor et al., 2020).

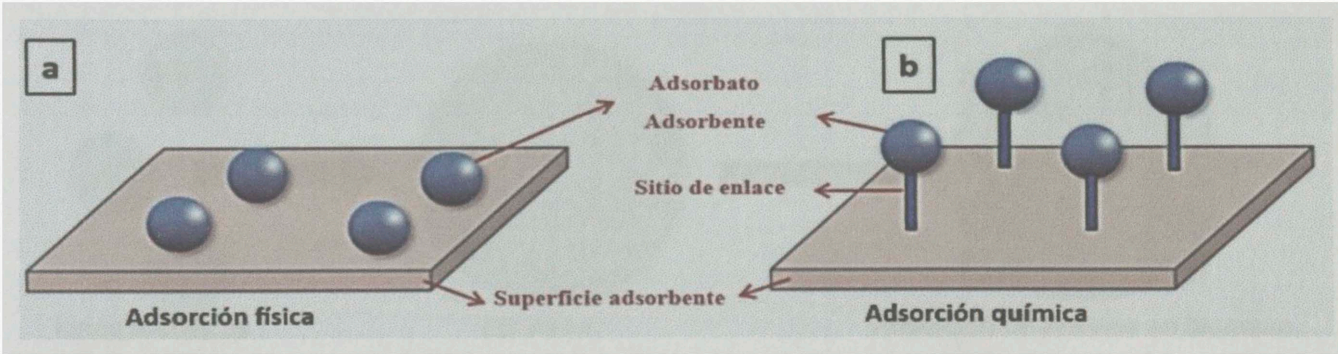
2.2.3 Adsorción

La adsorción es un método de separación donde átomos, iones o moléculas de un fluido se fijan en la superficie de un sólido conocido como adsorbente. Esta acumulación ocurre únicamente en la superficie, a diferencia de la absorción, donde el material penetra en todo el volumen del medio (Atkins & de Paula, 2006). La adsorción es ampliamente utilizada en el tratamiento de aguas residuales para la eliminación de contaminantes orgánicos e inorgánicos, incluyendo metales pesados como el plomo (Pb^{2+}), debido a su eficiencia, simplicidad y bajo costo operativo.

La adsorción puede clasificarse principalmente en dos tipos, según la naturaleza de las fuerzas que intervienen en el proceso: física y química.

- i. **Adsorción física.** También conocida como fisisorción, ocurre por fuerzas intermoleculares débiles, principalmente las interacciones de Van der Waals. Este tipo de adsorción no implica una transferencia electrónica significativa ni la formación de enlaces químicos. Es un proceso reversible, por lo general más rápido, y puede producirse a temperaturas bajas o moderadas. Su principal ventaja es la posibilidad de regenerar el adsorbente fácilmente, lo cual es útil en aplicaciones donde se requiere su reutilización (Atkins & de Paula, 2006).
- ii. **Adsorción química.** También conocida como quimisorción, corresponde a un proceso en el que las moléculas del adsorbato establecen enlaces fuertes con los sitios activos de la superficie del adsorbente. Estos enlaces pueden ser de tipo covalente o iónico, lo que confiere al proceso una mayor especificidad y estabilidad. Generalmente, la quimisorción requiere mayor energía de activación, por lo que ocurre más eficientemente a temperaturas elevadas. Este tipo de adsorción suele ser irreversible y se caracteriza por una baja capacidad de regeneración del adsorbente, aunque ofrece una retención más firme del contaminante (Atkins & de Paula, 2006).

Figura 10:
Adsorción física (a) y adsorción química (b)



Nota: Diferencia entre adsorción física (a), caracterizada por interacciones débiles en la superficie, y adsorción química (b), donde se forman enlaces fuertes entre el adsorbato y el adsorbente. Adaptado de (Soonmin, 2022).

Tabla 5:
Diferencias entre la adsorción física y adsorción química

Adsorción física	Adsorción química
Intervienen fuerzas de atracción de Van der Waals	Interviene un enlace químico
Se considera un proceso reversible	Se considera un proceso irreversible
No requiere energía de activación	Requiere energía de activación
Menor valor de calor de adsorción	Mayor valor de calor de adsorción
Ocurre a temperaturas más bajas	Ocurre a temperaturas más altas

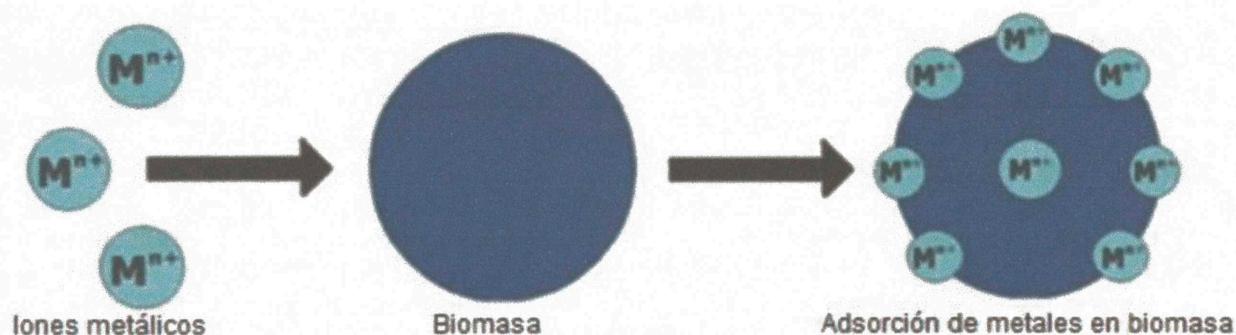
Nota: Adaptado de (Soonmin, 2022).

2.2.4 Bioadsorción

La bioadsorción es una técnica derivada de la adsorción y es un método de eliminación de metales pesados no convencional que tiene ventajas de bajo costo, alta eficiencia, posibilidad de recuperación de metales pesados y una producción insignificante de lodos. Dentro de los múltiples desechos orgánicos como posibles biosorbentes, el mesocarpio y epicarpio de sandía es un material natural, barato y abundante; contiene una gran fuente de aminoácidos no esenciales, citrulina, carotenoides, celulosa, pectina y proteínas. Estos compuestos tienen varios grupos funcionales como -COOH, -OH, -NH₂ que pueden unirse a los metales pesados (Letechipia et al., 2023).

Figura 11:

Esquema del proceso de adsorción de iones metálicos en biomasa



Nota: Tomado de (Córdova et al., 2006).

2.2.5 Plomo

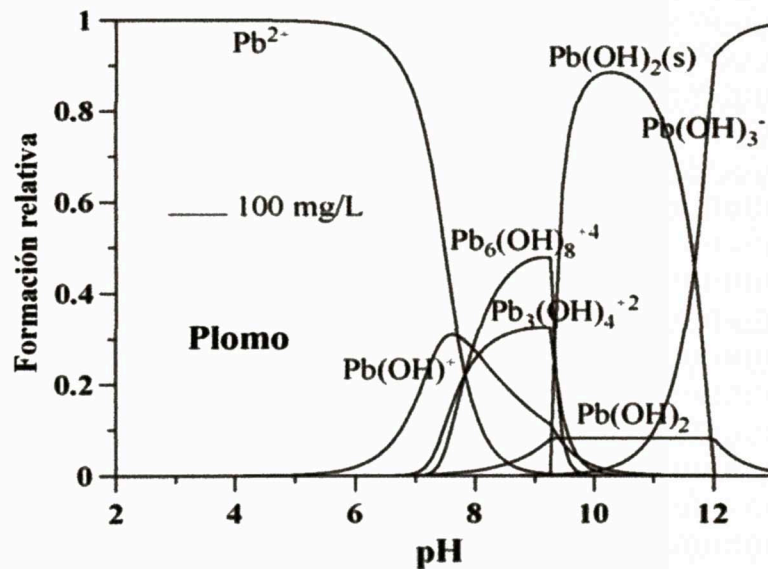
El plomo es un metal ampliamente utilizado desde la antigüedad debido a su abundancia natural, facilidad de extracción y maleabilidad. Sin embargo, a pesar de sus diversas aplicaciones, este metal es considerado uno de los más tóxicos para la salud humana. La contaminación ambiental por plomo se remonta probablemente a la Edad del Bronce, intensificándose en la era moderna debido al aumento de actividades antropogénicas. Este metal puede ingresar al organismo principalmente por tres vías: consumo de alimentos (alrededor del 65%), ingestión de agua (20%) y exposición al aire contaminado (15%). La quema de combustibles, ciertos procesos industriales y la incineración de residuos sólidos son fuentes comunes que incrementan los niveles de plomo en el ambiente. Además, la corrosión de tuberías antiguas y de pinturas con base de plomo puede facilitar su liberación en sistemas de agua potable o su infiltración en suelos. Una característica importante del plomo es que no puede ser degradado ni eliminado del medio ambiente; solo puede transformarse en otras formas químicas, lo que lo convierte en un contaminante persistente. Esta persistencia, sumada a su toxicidad acumulativa, hace que el tratamiento y control del plomo en agua y suelos sea una prioridad en los enfoques de saneamiento ambiental (Nurchi & Villaescusa, 2008).

Para la determinación de plomo se dispone de diversas técnicas analíticas, entre ellas la espectroscopía de absorción atómica, emisión, masas, entre otros. Sin embargo, la determinación en muestras acuosas es un poco complicado debido a comúnmente las bajas concentraciones. La OMS establece un límite máximo de 10 µg/L de plomo en agua potable y el límite permisible para Pb^{2+} en aguas residuales dado por el Ministerio del Ambiente según el Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM es de 0,05 mg/L. En aguas residuales industriales, las concentraciones de iones se acercan a 200-500 mg/L; que es una relación muy alta con los estándares de calidad del agua. De ahí es que se busca un tratamiento adecuado para remover plomo de aguas residuales, tales como, intercambio iónico, precipitación, electrocoagulación, entre otros (Arbabi et al., 2015).

En este contexto, resulta relevante considerar diversos factores que influyen en la eficiencia de la remoción de plomo, como la concentración inicial del metal pesado, el tiempo de contacto con el adsorbente, la dosis empleada y las propiedades fisicoquímicas del material utilizado. Estos parámetros determinan la capacidad de captura del contaminante y la velocidad del proceso. Sin embargo, uno de los aspectos más determinantes es el pH de la solución, ya que influye directamente en la forma química del plomo presente. En la Figura 12 se muestra el diagrama de especiación del plomo, el cual permite visualizar cómo varían las especies, como Pb^{2+} , $Pb(OH)^+$ y $Pb(OH)_2$, en función del pH, información esencial para optimizar los procesos de tratamiento como la adsorción.

Figura 12:

Diagrama de especiación del plomo en función del pH.



Nota: Adaptado de (Nurchi & Villaescusa, 2008).

2.3 Marco Legal

- Ley General del Ambiente (Ley N° 28611) establece el marco legal para la protección del medio ambiente. Esta ley incluye las disposiciones sobre la gestión integral de residuos sólidos con el fin de promover su reducción, reutilización y reciclaje.
- Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos (Ley N°1278) fomenta la gestión de residuos sólidos y las prácticas sostenibles para la valorización de residuos. Esta ley promueve el desarrollo de tecnologías que permitan el aprovechamiento de los residuos agrícolas.
- Ley de Recursos Hídricos (Ley N°29338) regula el uso y gestión sostenible de los recursos hídricos. Define lineamientos orientados a preservar la calidad del agua y a prevenir la presencia de contaminantes.

Además, se contribuye a las ODS (Objetivos de Desarrollo Sostenible) con las metas: tres (salud y bienestar), seis (agua limpia y saneamiento), once (ciudades y comunidades sostenibles) y catorce (vida submarina).

Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación

3.1 Lugar de investigación

Los ensayos experimentales se desarrollaron en el laboratorio 14 de Química Orgánica y el laboratorio 21 de Investigación y Química Aplicada, pertenecientes a la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de Ingeniería.

3.2 Materiales y equipos

3.2.1 *Materiales de laboratorio*

En el presente estudio experimental se empleó material de vidriería convencional y especializado, incluyendo balones de fondo plano (100, 250, 500 mL), fiolas aforadas (5-100 mL) y un sistema de extracción Soxhlet de 250 mL con condensador. Para la manipulación de muestras se utilizó micropipetas, tubos de centrifuga y embudos de decantación.

3.2.2 *Equipos*

La presente investigación utilizó diversos equipos en cada una de las etapas de extracción, preparación y análisis de las muestras. Entre ellos se incluyeron una estufa Ecocell de 55 L para el secado de materiales, un agitador magnético DAIHAN-KR MSH-20D y una manta calefactora Boeco Germany KM-ME utilizados en los procesos de agitación y calentamiento controlado. Asimismo, se contó con una balanza analítica Solis-SAB 224e para garantizar la precisión en la pesada de reactivos, una prensa hidráulica Carl Zeiss Jena DDR para el prensado de las semillas, una centrifuga GEMMY PLC-025 para la separación de fases y una mesa agitadora orbital TECNAL TE-141 para asegurar una homogenización adecuada de las soluciones.

Para las mediciones de parámetros básicos de las soluciones se empleó un medidor portátil de pH/°C/EC/TDS HANNA HI9812-5. En la etapa analítica, se utilizaron equipos de mayor relevancia como el espectrofotómetro UV-Visible Thermo Scientific Evolution 201, empleado para las determinaciones de polifenoles y capacidad antioxidante; el cromatógrafo de gases Shimadzu Nexis GC-2030, empleado para la identificación de los ácidos grasos del aceite; el espectrómetro de absorción atómica Jarrell-Ash, para la cuantificación de plomo en las soluciones tratadas; y el espectrómetro FT/IR-4X de JASCO, fundamental para la caracterización estructural del bioadsorbente antes y después del proceso de adsorción.

3.3 Metodología

3.3.1 Recolección de materia prima

Las sandías fueron obtenidas del Mercado Mayorista de Frutas Santa Anita (Lima, Perú) a costo cero; se emplearon sandías que no se encontraban en condiciones de consumo humano e iban a ser desechadas. De acuerdo con la figura 13, la materia prima empleada corresponde a las semillas y mesocarpio de sandía.

Figura 13:



Nota: (a) Semillas de sandía y (b) mesocarpio de sandía sin pulpa. El secado se realiza durante 5 días a temperatura ambiente.

3.3.2 Limpieza y Secado

Lavar las semillas y mesocarpio de sandía con el objetivo de evitar la degradación que pueda traer los azúcares naturales y posteriormente secar al sol por 5 días. Además, secar las semillas en una estufa a 60 °C por 10 h con el objetivo de eliminar la humedad libre contenida; de igual manera, secar el mesocarpio sin cáscara a 65 °C por 13 h. Almacenar las semillas y mesocarpio de sandía secos en un frigorífico a 4 °C para posteriormente emplear en la experimentación. El contenido de humedad se calcula empleando la siguiente ecuación.

$$\% \text{ Humedad} = \left(\frac{W_0 - W_f}{W_0} \right) \times 100 \quad (2)$$

3.3.3 Extracción de aceite por solvente

Descascarar y triturar las semillas de *Citrullus Lanatus L.* secas en una licuadora comercial. Para la extracción del aceite, utilizar el método Soxhlet con hexano como solvente y agua a temperatura ambiente como refrigerante. Colocar las semillas trituradas en una malla con papel filtro para evitar que estas se atasquen en el sifón. Arrastrar el aceite a un balón redondo de 250 mL que contenga aproximadamente 140 mL de hexano a 70°C y contabilizar el número de descargas que realice el sifón por aproximadamente 3 horas. Concentrar el aceite con solvente en disolución a la mitad de su volumen por calentamiento en la manta calefactora, y la otra mitad con flujo de vacío con el objetivo de condensar el solvente a una temperatura que no afecte a las propiedades fisicoquímicas del aceite extraído. El porcentaje de recuperación de hexano y el rendimiento de extracción se calcula empleando las siguientes ecuaciones.

$$\% \text{ Recuperación de solvente} = \left(\frac{W_{\text{solvente recuperado}}}{W_{\text{solvente inicial}}} \right) \times 100 \quad (3)$$

$$\% \text{ Rendimiento de extracción} = \left(\frac{W_{\text{aceite}}}{W_{\text{semillas}}} \right) \times 100 \quad (4)$$

3.3.4 Extracción de aceite mediante prensado en frío

Las semillas de *Citrullus Lanatus L.* se descascaran y colocan enteras en una rejilla filtradora de acero inoxidable, diseñada con rendijas y un pistón de madera que permita el flujo del aceite extraído. Prensar el sistema mencionado en una prensa hidráulica manual; el aceite empieza a fluir a los 3 MPa y continuar extrayéndose hasta los 10 MPa. Al desmontar el sistema, muchas semillas se destrozan mientras que otras quedan enteras; por lo tanto, realizar prensados sucesivos para maximizar el rendimiento de extracción de aceite. Al final, se obtiene el aceite extraído por prensado en frío y una torta de semillas. Almacenar el aceite obtenido en un frasco ámbar, el cual proteja el contenido de la exposición a la luz, minimizando la degradación oxidativa. Se garantiza con este almacenamiento controlado la estabilidad y calidad del aceite, permitiendo su conservación adecuada para análisis posteriores.

Al finalizar la extracción, se obtiene una torta de semillas prensadas, y el aceite obtenido por centrifugación se conserva en un frasco ámbar para proteger sus compuestos antioxidantes de la degradación lumínica.

3.3.5 Preparación de ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME)

Para la preparación de las muestras se debe realizar la transesterificación en medio ácido para la obtención de los ésteres metílicos de los ácidos grasos (FAME), donde se sigue el método descrito por Cerón et al. (2012), con algunas modificaciones. Tomar una alícuota de 200 µL de aceite y adicionar 1 mL de hexano. Posteriormente, agregar 10 mL de una solución de H₂SO₄ al 4% en metanol. Someter la mezcla a reflujo a 70 °C durante 3 horas en agitación constante a 400 rpm. Finalizada la reacción, lavar la fase orgánica con 10 mL de agua osmótica y, luego de un período de reposo, adicionar 2 mL de hexano para facilitar la extracción de los FAME, los cuales deben ser separados y almacenados para su posterior análisis.

3.3.6 Análisis de FAME mediante cromatografía de gases

Para el análisis de los FAME, utilizar un estándar de ácidos grasos metilados para realizar una identificación cualitativa y cuantitativa de los ácidos grasos presentes en el aceite de semilla extraído por prensado en frío y Soxhlet. Analizar los FAME de las muestras y el estándar utilizando un cromatógrafo de gases Shimadzu Nexis GC-2030 conectado a una columna Supelco 16506B (30 m x 0.25mm x 0.25 µm) al cual inyectar 2 µL de cada muestra en el auto inyector AOC-20i. Emplear helio como gas portador a 30 mL/min. Detectar las muestras por medio de un detector de ionización de llama (FID) programado a 240 °C. Analizar los datos obtenidos en el software Shimadzu LabSolutions y realizar la cuantificación relativa de los ácidos grasos identificados usando normalización de área, según la Ecuación 5.

$$C_i = \left(\frac{A_i}{A_{est}} \right) \times C_{st} \quad (5)$$

Donde:

C_i: Concentración del ácido graso en la muestra (µg/mL)

3.3.5 Preparación de ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME)

Para la preparación de las muestras se debe realizar la transesterificación en medio ácido para la obtención de los ésteres metílicos de los ácidos grasos (FAME), donde se sigue el método descrito por Cerón et al. (2012), con algunas modificaciones. Tomar una alícuota de 200 μ L de aceite y adicionar 1 mL de hexano. Posteriormente, agregar 10 mL de una solución de H_2SO_4 al 4% en metanol. Someter la mezcla a reflujo a 70 °C durante 3 horas en agitación constante a 400 rpm. Finalizada la reacción, lavar la fase orgánica con 10 mL de agua osmótica y, luego de un período de reposo, adicionar 2 mL de hexano para facilitar la extracción de los FAME, los cuales deben ser separados y almacenados para su posterior análisis.

3.3.6 Análisis de FAME mediante cromatografía de gases

Para el análisis de los FAME, utilizar un estándar de ácidos grasos metilados para realizar una identificación cualitativa y cuantitativa de los ácidos grasos presentes en el aceite de semilla extraído por prensado en frío y Soxhlet. Analizar los FAME de las muestras y el estándar utilizando un cromatógrafo de gases Shimadzu Nexis GC-2030 conectado a una columna Supelco 16506B (30 m x 0,25mm x 0,25 μ m) al cual inyectar 2 μ L de cada muestra en el auto inyector AOC-20i. Emplear helio como gas portador a 30 mL/min. Detectar las muestras por medio de un detector de ionización de llama (FID) programado a 240 °C. Analizar los datos obtenidos en el software Shimadzu LabSolutions y realizar la cuantificación relativa de los ácidos grasos identificados usando normalización de área, según la Ecuación 5.

$$C_i = \left(\frac{A_i}{A_{est}} \right) \times C_{st} \quad (5)$$

Donde:

C_i : Concentración del ácido graso en la muestra (μ g/mL)

A_1 : Área bajo la curva correspondiente al ácido graso

C_{st} : Concentración del ácido graso en el estándar ($\mu\text{g/mL}$)

A_{est} : Área del pico del ácido graso en el estándar

3.3.7 Determinación de compuestos fenólicos totales

Se debe pesar 1 g de cada aceite de semilla de sandía. Agregar a cada muestra 4 mL de metanol y colocar en agitación constante a 200 rpm por 2 horas y en oscuridad. Posteriormente, centrifugar las muestras a 2150 rpm por 20 minutos. Finalmente, recuperar el sobrenadante y filtrar con papel filtro Whatman N°42. Para la cuantificación de los compuestos fenólicos totales, se siguió el método descrito por Ouassor et al. (2020), con algunas modificaciones presentadas en la Tabla 6. Adicionar 600 μL de extracto metanólico con 2500 μL de reactivo de Folin-Ciocalteu al 10% y dejar reposar por 5 minutos. Posteriormente, agregar 4000 μL de Na_2CO_3 (7% p/v) y dejar reposar en oscuridad por 2 horas. A continuación, registrar la absorbancia a 765 nm utilizando un espectrofotómetro UV-Vis y determinar la concentración de polifenoles totales usando la curva de calibración elaborada con ácido gálico en un rango de 0 a 300 $\mu\text{g/mL}$.

Tabla 6:

Soluciones estándar de ácido gálico empleadas en la curva de calibración.

Concentración Ácido			Folin Ciocalteu 0.2 N	Na_2CO_3 7%
Gálico ($\mu\text{g/mL}$)	Ácido gálico (μL)	Agua (μL)	(μL)	(p/v) (μL)
0	0	600	2500	4000
50	100	500	2500	2000
100	200	400	2500	2000
150	300	300	2500	2000
200	400	200	2500	2000
250	500	100	2500	2000
300	600	0	2500	2000

Nota: Las soluciones de trabajo se prepararon a partir de una solución stock de ácido gálico 300 ppm.

Los valores de contenido fenólico son expresados como equivalente de ácido gálico (mg GAE/ 100 g aceite), calculado según la Ecuación 6.

$$CFT = \frac{GAE \times V \times 100}{W} \quad (6)$$

Donde:

CFT: Contenido fenólico total equivalente de ácido gálico (mg GAE / 100 g aceite)

GAE: Equivalente de ácido gálico (µg/mL)

V: Volumen de la muestra (mL)

W: Peso de la muestra (g)

3.3.8 Evaluación de la capacidad antioxidante mediante ensayo DPPH

Evaluar la capacidad antioxidante del aceite de semilla de sandía mediante la inhibición de los radicales DPPH, según el método descrito por Munteanu et al. (2021) con algunas modificaciones presentado en la Tabla 7. Se debe mezclar 1 g de aceite obtenido por prensado frío y Soxhlet con 4 mL de metanol en agitación constante por 2 horas a 200 rpm y en oscuridad. Centrifugar la mezcla a 2050 rpm por 15 minutos y recuperar el sobrenadante.

Pesar 4 mg del radical 2,2-difenil-1-picrilhidrazilo (DPPH) y agregar 100 mL de metanol en agitación constante por 10 minutos, para luego dejar reposar en oscuridad por 30 minutos. Llevar la extracción metanólica a un rango de 0-60 mg/mL y añadir a 2 mL de cada concentración, 2 mL de DPPH 0.1 mM.

Tabla 7:

Preparación de muestras a partir de solución stock metanólica de 250 mg/mL.

Concentración aceite (mg/mL)	Extracto metanólico (μL)	Metanol (μL)	DPPH (μL)
0	0	2000	2000
10	80	1920	2000
20	160	1840	2000
30	240	1760	2000
40	320	1680	2000
50	400	1600	2000
60	480	1520	2000

La lectura de las absorbancias se realiza a 517 nm empleando un espectrofotómetro UV-Vis. La actividad de eliminación de radicales (RSA) se determina mediante el porcentaje de decoloración del radical DPPH y la concentración de aceite requerida para inhibir el 50% de los radicales presentes (IC₅₀) para cada aceite extraído por prensado en frío y Soxhlet.

$$\%RSA = \left(\frac{A_c - A_m}{A_c} \right) \times 100 \quad (7)$$

Donde:

%RSA: Porcentaje de inhibición del radical libre DPPH

A_c: Absorbancia de control

A_m: Absorbancia de la muestra

3.3.9 Remoción de plomo (Pb^{+2}) con mesocarpio de sandía

Para evaluar la remoción de plomo en solución acuosa, se emplea mesocarpio seco de sandía como bioadsorbente, el cual es previamente triturado con el objetivo de aumentar el área de contacto entre la solución de plomo y el bioadsorbente.

Se prepara una solución patrón de plomo a concentración de 100 ppm a partir de una solución estándar (100 mg Pb/1000 mL), adecuada para su análisis mediante espectroscopía de Absorción Atómica (AAs) a una longitud de onda de 217 nm. A partir de esta solución madre, preparar por dilución otras soluciones patrón, para utilizarlas en el desarrollo experimental. La evaluación de la capacidad adsorbente del mesocarpio se realiza mediante ensayos independientes, considerando variables como el tiempo de residencia del bioadsorbente, pH de la solución, concentración inicial de plomo y dosaje de bioadsorbente. Para ello, se prepara soluciones a diferentes concentraciones, ajustando el pH con ácido nítrico (3M) o hidróxido de sodio (2N), según fuera necesario. En alícuotas de 40 mL de las soluciones de plomo a diferentes concentraciones, añadir la dosis correspondiente de bioadsorbente. Las mezclas se agitan por 20 segundos y se dejan reposar el tiempo de residencia establecido para la prueba. Finalizando este tiempo, decantar cada solución y centrifugar para evitar posibles residuos sólidos de bioadsorbente.

Para la cuantificación de contenido de plomo, se debe realizar lecturas por espectroscopía de Absorción Atómica de cada solución, utilizando una llama de aire-acetileno como fuente de atomización. El porcentaje de remoción de Pb^{2+} se calcula siguiendo la Ecuación 8.

$$\%R = \left(\frac{C_0 - C_f}{C_0} \right) \times 100 \quad (8)$$

Donde:

%R: Porcentaje de remoción de Pb^{2+}

C_0 : Concentración inicial de Pb^{2+} (ppm)

C_f : Concentración final de Pb^{2+} (ppm)

Asimismo, la cantidad de plomo absorbido por gramo de bioadsorbente se determina siguiendo la Ecuación 9.

$$q_t = \frac{(C_0 - C_f) \cdot V}{m} \quad (9)$$

Donde:

q_t : Cantidad de Pb^{2+} retenido en un tiempo específico (mg/g)

V: Volumen de la solución (L)

m: Masa del bioadsorbente utilizado (g)

Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados

Los resultados experimentales se expresarán como promedio $\pm$ error estándar de la media (SE) según lo descrito por Skoog et al. (2007), calculado según la Ecuación 10:

$$SE = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (10)$$

Donde:

SE: Error estándar.

s: Desviación estándar.

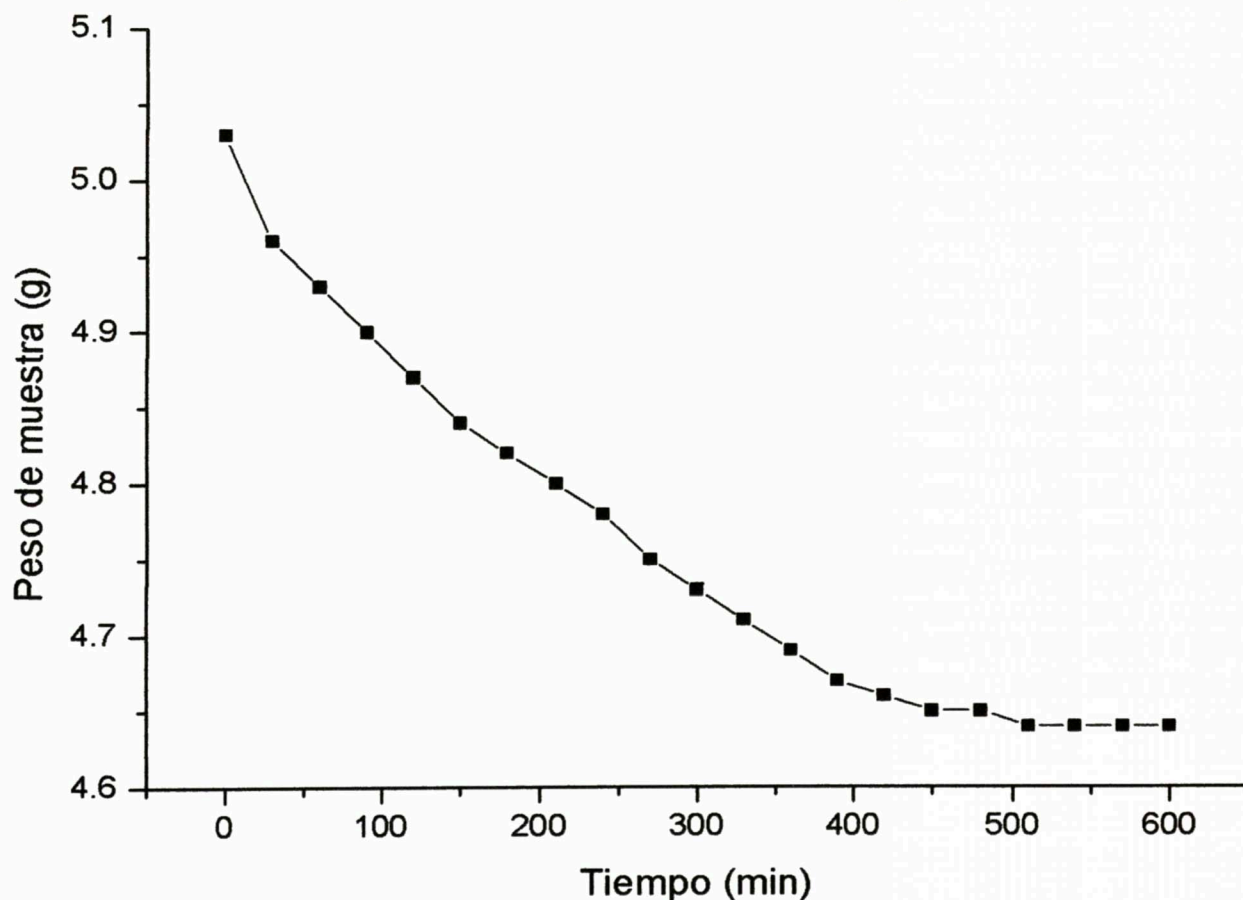
n: Número de repeticiones.

4.1 Determinación de la pérdida de humedad en la semilla de sandía

Las pruebas para evaluar la pérdida de humedad en las semillas se realizaron utilizando muestras de aproximadamente cinco gramos. El control de peso se llevó a cabo a 60 °C registrándose cada 30 minutos durante aproximadamente 10 horas. La Figura 14 ilustra el comportamiento asintótico de la deshidratación con respecto al tiempo en una de las muestras en control. El contenido de humedad (Ecuación 2) es de 7,75%.

Figura 14:

Pérdida de humedad en la semilla de sandía en función del tiempo.



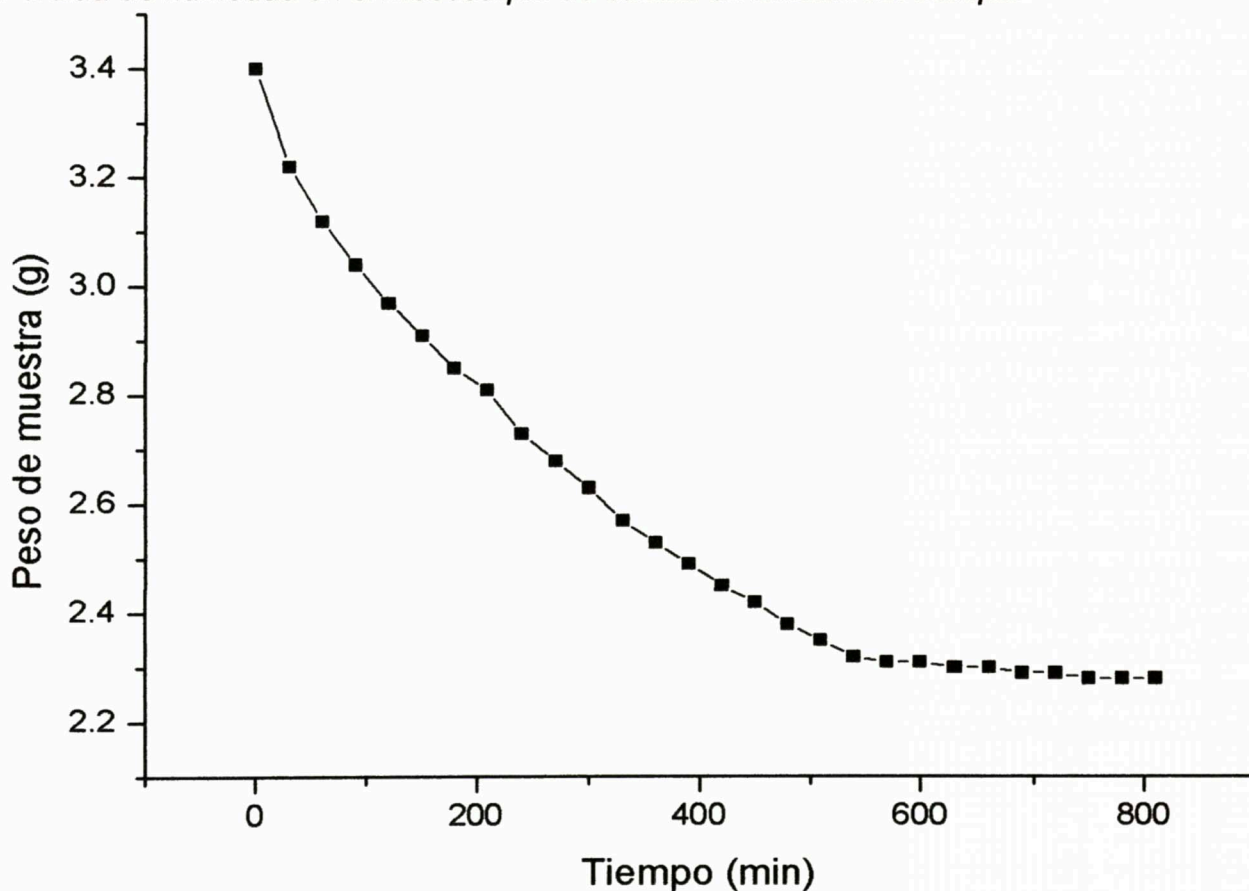
Nota: Elaboración propia.

4.2 Determinación de la pérdida de humedad en el mesocarpio de sandía

Las evaluaciones de pérdida de humedad en el mesocarpio de sandía se llevaron a cabo con muestras de aproximadamente 4 g. Se controló el peso a 65 °C en intervalos de 30 minutos durante unas 13 horas. La Figura 15 ilustra el comportamiento asintótico de la pérdida de humedad a lo largo del tiempo en una de las muestras en control. El contenido de humedad (Ecuación 2) es de 32,94%.

Figura 15:

Pérdida de humedad en el mesocarpio de sandía en función del tiempo.



Nota: Elaboración propia.

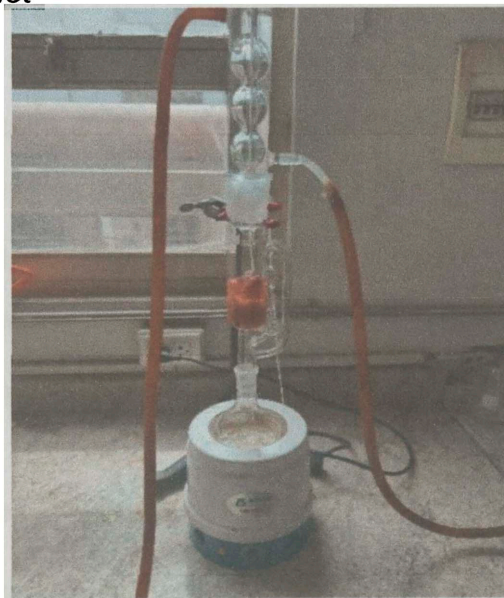
4.3 Extracción Soxhlet empleando hexano como solvente

4.3.1 Extracción de aceite de semilla

Las pruebas para determinar el rendimiento del método Soxhlet en la extracción de aceite con hexano como solvente se realizaron utilizando muestras entre 20 y 30 gramos de semillas descascaradas y trituradas. En la Figura 16 se muestra el equipo Soxhlet sobre una manta calefactora en operación.

Figura 16:

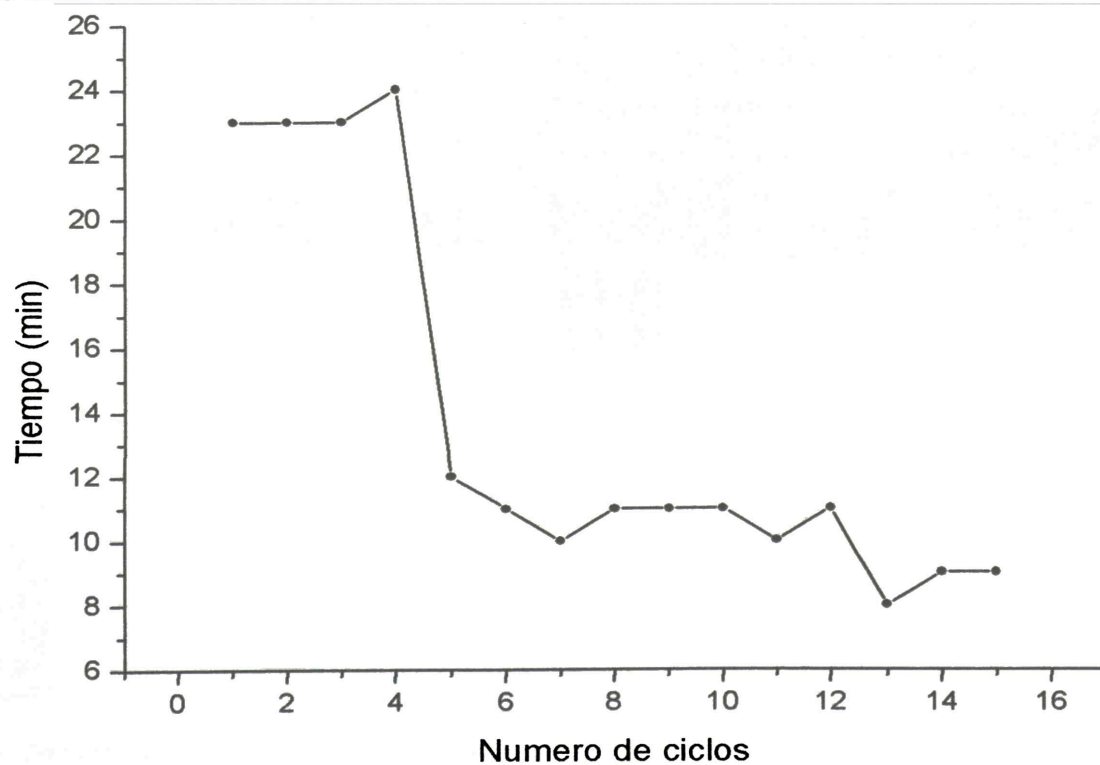
Equipo de extracción Soxhlet



Nota: Extracción Soxhlet empleando hexano como solvente orgánico en un balón de 250 mL.

Figura 17:

Tiempo estimado transcurrido entre ciclos en la extracción Soxhlet.



Nota: Elaboración propia.

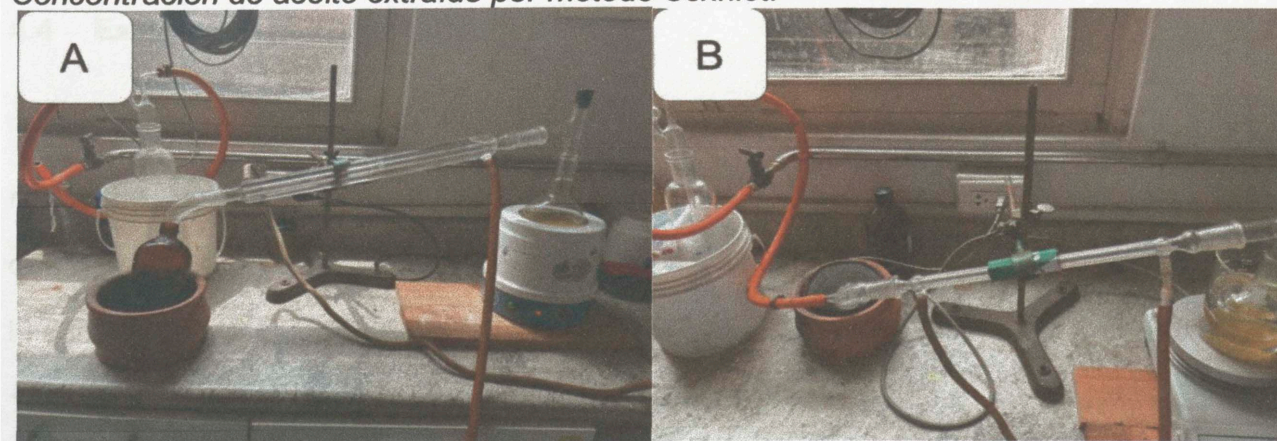
El proceso de extracción empleó 15 ciclos en cada una de las pruebas. De acuerdo con la Figura 17, observamos que hasta el cuarto ciclo de extracción se tiene un tiempo promedio de descarga de 23 minutos. Esto se debe a que, al inicio del proceso, la temperatura era más baja para evitar la degradación térmica de los ácidos grasos y otros compuestos sensibles. Como resultado, el disolvente tardó más en saturarse con el aceite, prolongando los tiempos de cada ciclo. Al aumentar paulatinamente la temperatura, la viscosidad del aceite disminuyó y su solubilidad en el hexano aumentó, lo que optimizó la extracción y redujo los tiempos entre ciclo de extracción.

4.3.2 Concentración y recuperación de aceite

Después de la extracción por Soxhlet, el extracto obtenido fue concentrado hasta la mitad de su volumen por evaporación en la manta calefactora (Figura 18a). Posteriormente, se realizó una concentración final con flujo de vacío en baño maría (Figura 18b), con el objetivo de reducir la temperatura de evaporación del solvente y evitar la degradación térmica del aceite.

Figura 18:

Concentración de aceite extraído por método Soxhlet.



Nota: (a) Concentración de aceite en manta calefactora, (b) concentración con flujo de vacío en baño maría.

Finalizando el proceso de concentración, se recuperó el aceite por centrifugación a 2500 rpm por 15 minutos para separar impurezas, gomas y trazas de solvente que quedaron de los procesos anteriores.

Se pudo determinar el volumen de solvente recuperado (Ecuación 3) y el rendimiento de la extracción (Ecuación 4). A continuación, la Tabla 8 muestra un resumen de tres ensayos de extracción de aceite mediante el método Soxhlet, aplicando el principio de repetibilidad.

Tabla 8:

Ensayos de extracción de aceite por método Soxhlet

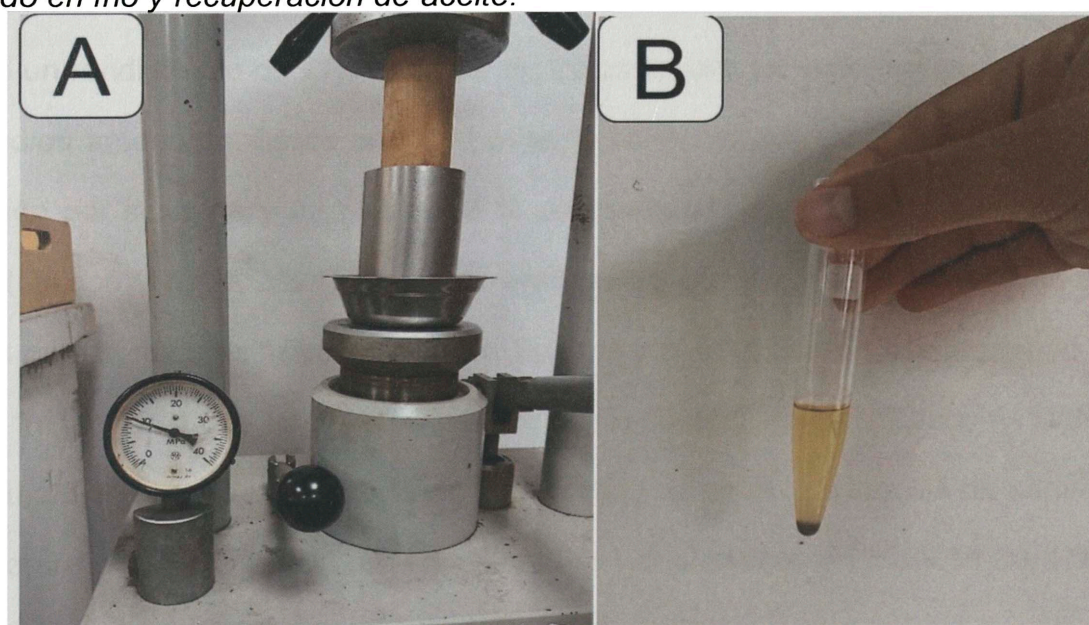
Parámetros	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
Tiempo de extracción (min)	206	183	189
Volumen de hexano empleado (mL)	142	148	142
Volumen de hexano recuperado (mL)	87	96	105
Recuperación de solvente (%)	61.27%	64.86%	73.94%
Peso de semillas (g)	23.19	26.74	25.03
Aceite extraído (g)	6.64	7.14	6.95
Rendimiento de extracción (%)	28.63%	26.70%	27.77%

4.4 Extracción por prensado en frío

El prensado en frío se realizó mediante un sistema que permitía al aceite fluir en un recipiente de metal para su posterior recuperación. A diferencia de la extracción por Soxhlet que empleaba la semilla triturada, para la extracción por prensado en frío se considerará la semilla descascarada entera. El proceso se llevó a cabo en un rango de presión de 3 a 10 MPa en una prensa hidráulica manual (Figura 19a) empleando prensados sucesivos. El rendimiento de la extracción será determinado empleando la Ecuación 4. La Tabla 9 presenta los resultados obtenidos en uno de los ensayos realizados mediante este método de extracción.

Figura 19:

Prensado en frío y recuperación de aceite.



Nota: (a) Sistema de prensado en frío conformado por un pistón de madera, un soporte de metal y un recipiente para almacenar la semilla y su aceite, (b) aceite de semilla centrifugado donde precipita impurezas.

Tabla 9:

Ensayos de extracción de aceite por prensado en frío

Parámetros	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
Número de prensados	3	3	3
Peso de semillas (g)	15.26	24.46	15.23
Aceite extraído (g)	2.21	3.26	2.42
Rendimiento de extracción (%)	14.48%	13.33%	15.89%

4.5 Rendimientos de extracción de aceite

Los rendimientos de las extracciones de aceite empleando prensado en frío y método Soxhlet se resumen en la Tabla 10.

Tabla 10:

Rendimientos de extracción de aceite por ambos métodos

Tipo de extracción	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Rendimiento promedio	Desviación estándar	Rendimiento de extracción (%)
Prensado en frío	14.48%	13.33%	15.89%	14.57%	1.28%	14.57 ± 0.74
Método Soxhlet	28.63%	26.70%	27.77%	27.70%	0.97%	27.70 ± 0.56

El rendimiento de la extracción de aceite de semilla de sandía obtenido mediante prensado en frío fue de $14,57 \pm 0,74$ %, mientras que empleando el método Soxhlet se alcanzó un rendimiento de $27,70 \pm 0,56$ %. Estos resultados son inferiores a lo reportado en estudios anteriores donde se logró obtener rendimientos de $32,96 \pm 0,78$ % para la extracción por solvente y $23,27 \pm 0,56$ % por prensado en frío del aceite de semilla de sandía (Quispe Minaya, 2024). En otra investigación, donde se emplea el aceite de sandía para su caracterización fisicoquímica en Ecuador, el rendimiento por prensado en frío y Soxhlet fue de 19,25% y 18,37%, respectivamente (Castro Holguin & Jacome Calie, 2022). Otro estudio en Marruecos sobre la caracterización de aceite de semilla de sandía reportó rendimientos de $21,4 \pm 1,50$ % para la extracción por prensado en frío y $36,3 \pm 1,90$ % para extracción por Soxhlet (Ouassor et al., 2020).

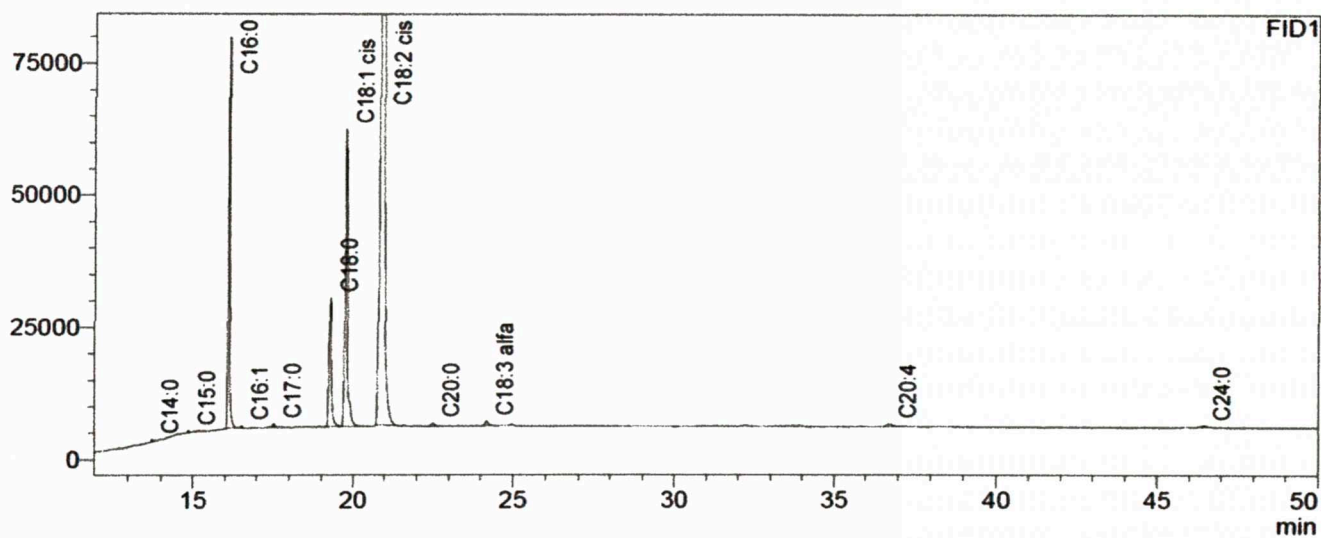
La variabilidad en los rendimientos puede estar asociada a múltiples factores, siendo uno de ellos la variedad de sandía usada y su origen botánico. Si bien el método Soxhlet presenta mayor rendimiento de extracción de aceite, el prensado en frío podría ser un método de extracción más adecuado cuando se prioriza la calidad del aceite y se plantea aplicar en la industria alimentaria, cosmética y farmacéutica debido a que no emplea solventes químicos y calor excesivo, lo cual preserva mejor algunos compuestos bioactivos en su extracción.

4.6 Análisis de ácidos grasos en el aceite

El análisis del contenido de ácido grasos en el aceite de semilla extraído por prensado en frío y Soxhlet se hace en comparación con el estándar de ácidos grasos FAME Mix (37C), Chem-Lab por cromatografía de gases con detector de ionización de llama (GC-FID). Las Figura 20 y Figura 21 muestran los cromatogramas obtenidos de los aceites extraídos por prensado en frío y Soxhlet, respectivamente.

Figura 20:

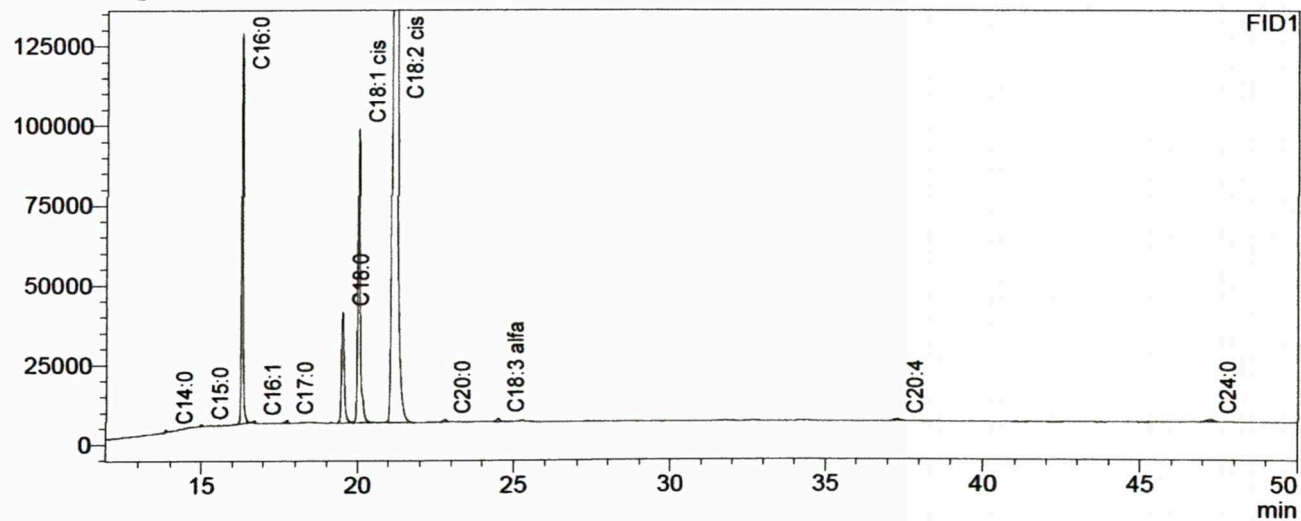
Cromatograma de aceite extraído por prensado en frío



Nota: Cromatograma obtenido por análisis comparativo en el software Shimadzu LabSolutions.

Figura 21:

Cromatograma de aceite extraído por método Soxhlet



Nota: Cromatograma obtenido por análisis comparativo en el software Shimadzu LabSolutions.

Tabla 11:

Composición de ácidos grasos para el aceite de semilla de sandía

Ácidos grasos	Tipo de extracción	
	Prensado en frío	Soxhlet
Ácidos grasos saturados	21.08%	22.21%
C14:0 Ácido mirístico	0.06%	0.06%
C15:0 Ácido pentadecanoico	0.03%	0.05%
C16:0 Ácido palmítico	13.17%	13.32%
C17:0 Ácido margárico	0.10%	0.12%
C18:0 Ácido esteárico	6.82%	7.79%
C20:0 Ácido araquídico	0.56%	0.67%
C24:0 Ácido lignocérico	0.33%	0.20%
Ácidos grasos monoinsaturados	10.73%	11.11%
C16:1 Ácido palmitoleico	0.07%	0.06%
C18:1 cis Ácido oleico	10.66%	11.05%
Ácidos grasos poliinsaturados	68.73%	67.21%
C18:2 cis Ácido linoleico	68.42%	66.74%
C18:3 (α) Ácido α-linolénico	0.10%	0.14%
C20:4 Ácido araquidónico	0.21%	0.33%
Ácidos grasos insaturados totales	79.46%	78.32%

Nota: Cuantificación por normalización (Ecuación 5), en comparación con el estándar de ácidos grasos FAME Mix (37C), Chem-Lab.

De acuerdo con los resultados obtenidos en la Tabla 11, el perfil de ácidos grasos de los aceites extraídos por prensado en frío (PF) y método Soxhlet (SX), permitió evidenciar diferencias según el método de extracción empleado. El aceite obtenido por prensado en frío presentó un contenido total de ácidos grasos insaturados de 79,46%, frente al 78,32% obtenido por método Soxhlet. En comparativa, el contenido de ácidos grasos insaturados totales obtenidos en esta investigación son superiores a los reportados anteriormente (68,25% PF; 70,30% SX) en la variedad de sandía *Citrullus lanatus* L. (Cheikhyoussef et al., 2017). Sin embargo, estos niveles de ácidos grasos insaturados totales fueron inferiores (82,11%) en el aceite de semilla de la misma especie extraído por prensado en frío y empleando éter de petróleo como solvente (de Conto et al., 2011). En

cuanto a los ácidos grasos saturados, los valores fueron de 21,08% para el aceite extraído por prensado en frío y 22,01% por Soxhlet. Estos resultados fueron inferiores a los reportados por Cheikhyyoussef et al. (2017) donde obtuvieron 31,75% de ácidos grasos saturados totales. Por otro lado, los valores obtenidos fueron superiores a los reportados por Quispe Minaya (2024) en Huancayo y Conto et al. (2011) para la misma especie, quienes informaron concentraciones de ácidos grasos saturados totales de 12,69% y 17,90% en el aceite de semilla de sandía.

El ácido graso mayoritario presente en el aceite de semilla extraído por prensado en frío y Soxhlet fue el ácido linoleico con 68,42 y 66,74%, respectivamente. El ácido linoleico se considera esencial para los seres humanos, ya que el organismo no posee enzimas necesarias para introducir dobles enlaces en la cadena hidrocarbonada más allá del carbono 9, lo que impide su síntesis endógena (Cerón et al., 2012). Además, el ácido linoleico actúa como precursor en la síntesis del ácido araquidónico y participa en la producción de las prostaglandinas, en la formación de membranas celulares y en diversos procesos biológicos relacionados con la regeneración celular (Perez Ruiz et al., 1998). Su deficiencia puede ocasionar alteraciones dermatológicas, como la dermatitis, deshidratación de la piel, entre otras afecciones similares (Valenzuela B & Morgado T, 2005). El alto contenido de ácido linoleico en el aceite de semilla de sandía, lo posiciona como una excelente fuente de ácidos grasos esenciales omega-6. Por ello es también importante mencionar que, dentro de estos ácidos grasos poliinsaturados, se encuentra el ácido α -linolénico en concentraciones mínimas. (0,10 en prensado – 0,14% en Soxhlet), donde su presencia sigue siendo relevante en la valoración nutricional del aceite al tratarse de un ácido graso esencial omega-3.

El ácido palmítico es el ácido graso saturado predominante en el aceite de semilla de sandía, presentando un contenido del 13,17% en el aceite extraído mediante prensado en frío y del 13,32% en el obtenido por el método Soxhlet. Le sigue en abundancia el ácido

esteárico, con un 6,82% y 7,79% en los aceites extraídos prensado en frío y Soxhlet, respectivamente. Estos ácidos grasos saturados son ampliamente utilizados en la industria cosmética, alimentaria y farmacéutica como componentes en la formulación de emulsificantes y surfactantes, debido a sus propiedades estabilizantes y su compatibilidad con matrices lipídicas (Torres Romero et al., 2017).

En ácido oleico también se encuentra en una proporción significativa en el aceite de semilla de sandía, con 10,66% en el aceite extraído por prensado en frío y del 11,05% en el obtenido por Soxhlet. Este ácido graso es valorado en la industria cosmética por sus propiedades emolientes, y frecuentemente se emplea en formulaciones tópicas, así como en mezclas con aceites minerales (Cerón et al, 2012). Otro ácido graso monoinsaturado que se presenta es el ácido palmitoleico en cantidades mínimas (0,06 – 0,07%).

Según lo reportado por Biswas et al. (2017), al comparar perfiles de ácidos grasos en semillas de *Citrullus Lanatus L.*; se observó que el ácido linoleico (50,78 – 72,6%), el ácido palmítico (9,84 – 15,47%), el ácido oleico (10,8 – 20,53%) y ácido esteárico (6,36 – 12,61%) eran los principales componentes del aceite. En otro estudio se compara el perfil de los ácidos grasos en la semilla extraída por prensado en frío y Soxhlet, donde se reporta como ácidos grasos mayoritarios al ácido linoleico (56,81% PF; 52,57% SX), ácido palmítico (16,34% PF; 14,84% SX), ácido esteárico (14,11% PF; 13,83% SX), ácido oleico (11,44% PF; 17,73% SX) y ácido araquídico (1,3% PF; 1,03% SX) en ese orden (Cheikhyoussef et al., 2017). También se reportaron concentraciones mínimas de ácido mirístico, ácido palmitoleico, ácido araquídico, ácido linolénico y ácido lignocérico con valores por debajo del 1% en el perfil de ácidos grasos (de Conto et al., 2011).

En comparación con los estudios mencionados, los valores obtenidos en esta investigación se encuentran dentro de los rangos reportados previamente. Las variaciones observadas pueden atribuirse principalmente a las técnicas de extracción utilizadas, así

como a las diferencias entre las variedades de sandía empleadas. Gracias a su perfil enriquecido de ácidos grasos, este aceite se utiliza en la cocina y como aditivo alimentario en países occidentales y del norte de África (Logaraj et al., 2008).

4.7 Determinación de los compuestos fenólicos totales

La determinación de los compuestos fenólicos totales del aceite de semilla fue medida en referencia a una curva de calibración de ácido gálico. En la Figura 22, se muestran las soluciones con concentraciones de 0 a 300 ppm de ácido gálico. La Tabla 12 presenta los resultados obtenidos para la curva de calibración de ácido gálico mediante el método de Folin-Ciocalteu. La medición se llevó a cabo por espectrometría UV-Visible a 765 nm.

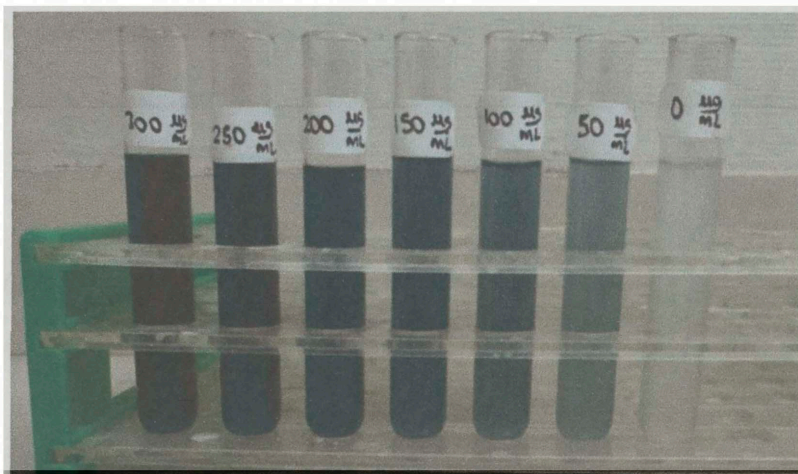
Tabla 12:

Datos experimentales para la curva de calibración de ácido gálico

Concentración (ppm)	Absorbancia (765 nm)
0	0.073
50	0.553
100	0.930
150	1.308
200	1.692
250	2.089
300	2.446

Figura 22:

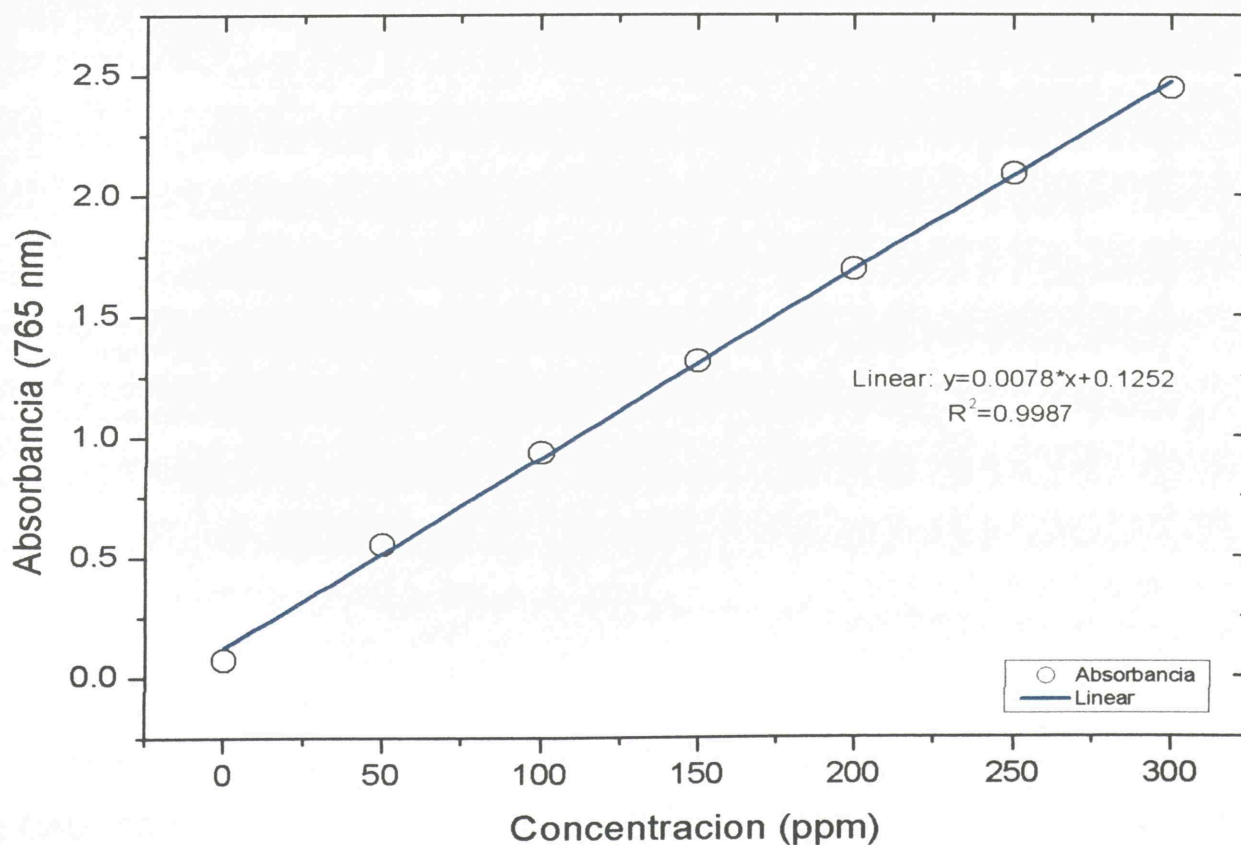
Curva de calibración con ácido gálico (0-300 ppm)



Nota: De derecha a izquierda se muestran las soluciones estándar de ácido gálico en un rango de 0 a 300 ppm, utilizadas para la elaboración de la curva de calibración.

Figura 23:

Curva de calibración de ácido gálico



Nota: La regresión lineal se obtuvo a partir de la relación entre la concentración de ácido gálico (ppm) y la absorbancia a 765 nm.

De acuerdo con la Figura 23, los resultados de la curva de calibración mantiene un coeficiente de determinación $R^2=0,9987$, lo que indica que se obtuvo un buen ajuste lineal. En la Tabla 13 se presentan uno de los ensayos de las muestras de aceites obtenidos mediante Soxhlet y prensado en frío, preparados a 250 mg/mL en metanol.

Tabla 13:

Contenido de polifenoles totales en el aceite de semilla de sandía

Muestra	Absorbancia	Absorbancia Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación	mg GAE / 100 g aceite
EPF-A	1.650				
EPF-B	1.626	1.635	0.0129	0.79%	77.425 ± 0.66
EPF-C	1.63				
ESX-A	1.758				
ESX-B	1.72	1.725	0.0304	1.76%	82.041 ± 1.56
ESX-C	1.698				

Nota: EPF: Extracción por prensado en frío, ESX: Extracción Soxhlet.

Según los resultados obtenidos en la Tabla 13, el contenido equivalente de ácido gálico en el aceite extraído por prensado en frío fue de $77,43 \pm 0,66$ mg GAE/100 g de aceite, mientras que en el aceite obtenido mediante Soxhlet se registró un valor de $82,04 \pm 1,56$ mg GAE/g de aceite. Estos resultados indican que la extracción mediante Soxhlet permitió recuperar mayor cantidad de compuestos fenólicos. Esta diferencia podría atribuirse a las condiciones de extracción, tales como temperatura y tiempo de contacto con el solvente, que facilitan la liberación de fenoles asociados a la matriz lipídica del aceite.

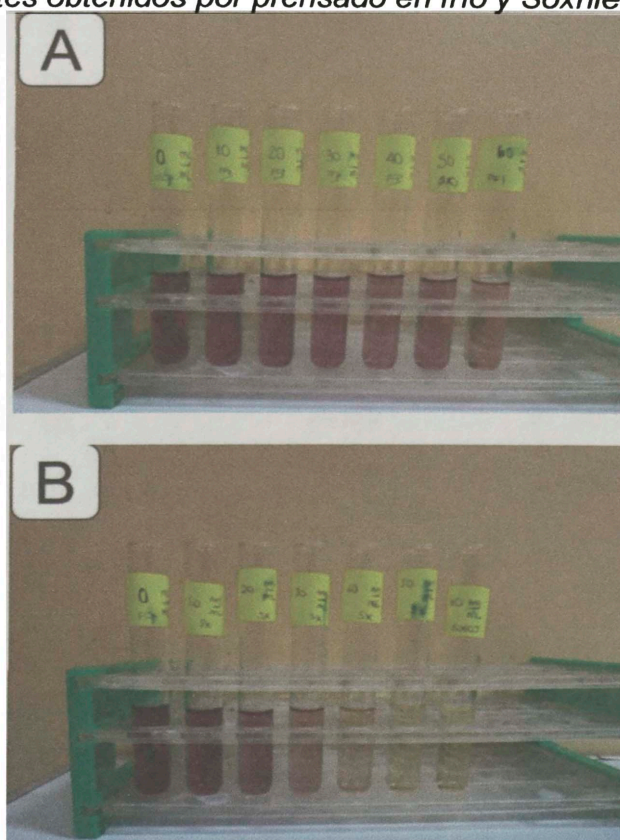
En comparación con los resultados obtenidos por Ouassor et al. (2020) registraron menor contenido fenólico en el aceite de semilla de sandía (*Citrullus lanatus* L.) con 34,0 mg GAE/100 g de aceite para el aceite extraído por prensado en frío, y 89,5 mg GAE/100 g de aceite para el de extracción por método Soxhlet.

4.8 Capacidad antioxidante del aceite mediante inhibición de radicales DPPH

La capacidad antioxidante del aceite de semilla se evaluó mediante la inhibición del radical DPPH. La Tabla 14 y Tabla 15 presentan los resultados correspondientes a los ensayos utilizando extracto metanólico de aceite extraído por prensado en frío y Soxhlet, respectivamente. De acuerdo con la Figura 24, las pruebas se llevaron en un rango de concentraciones de 0-60 mg/mL, empleando una solución de DPPH 0,1 mM. Las mediciones de absorbancia se realizaron por espectrofotometría UV-Visible a 517 nm y cada ensayo se llevó por triplicado.

Figura 24:

Ensayo DPPH de aceites obtenidos por prensado en frío y Soxhlet.



Nota: Ensayo de inhibición de radicales DPPH con extractos metanólicos de aceite extraído por (a) prensado en frío y (b) método Soxhlet. De izquierda a derecha se observan las concentraciones de 0 a 60 mg/mL.

Tabla 14:*Actividad antioxidante del aceite extraído por prensado en frío.*

Prueba	Concentración (mg/mL)	Absorbancia	% RSA	IC ₅₀ (mg/mL)
Rep. 1	0	0.696	0.000%	52.15
	10	0.650	6.609%	
	20	0.625	10.201%	
	30	0.606	12.931%	
	40	0.491	29.454%	
	50	0.439	36.925%	
	60	0.314	54.885%	
Rep. 2	0	0.696	0.000%	52.41
	10	0.649	6.753%	
	20	0.622	10.632%	
	30	0.606	12.931%	
	40	0.489	29.741%	
	50	0.440	36.782%	
	60	0.316	54.598%	
Rep. 3	0	0.696	0.000%	52.23
	10	0.649	6.753%	
	20	0.623	10.489%	
	30	0.607	12.787%	
	40	0.490	29.598%	
	50	0.440	36.782%	
	60	0.312	55.172%	
RSA promedio (%)			54.89 ± 0.17	
IC ₅₀ promedio (mg/mL)			52.26 ± 0.08	

Nota: RSA: Actividad de eliminación de radicales. IC₅₀: Concentración inhibidora media

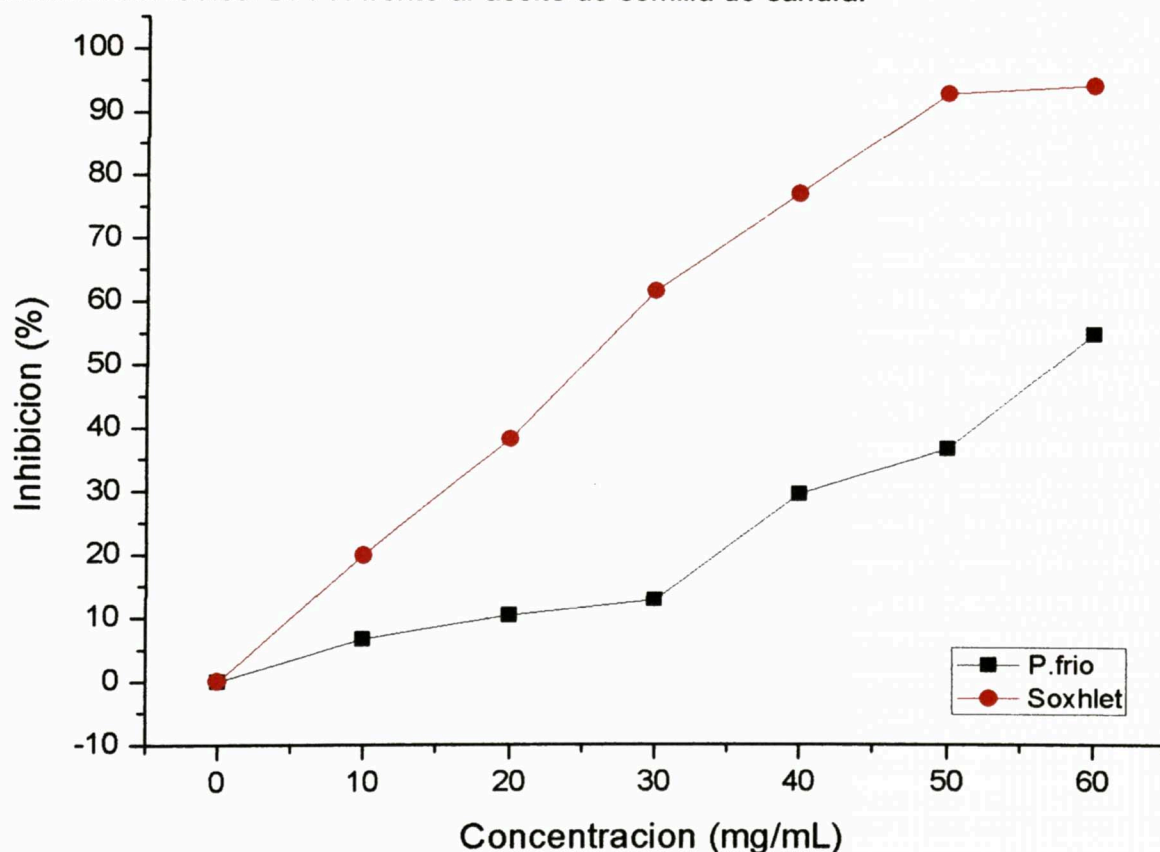
Tabla 15:*Actividad antioxidante del aceite extraído por método Soxhlet.*

Efecto antioxidante del aceite extraído por método Soxhlet.				
Prueba	Concentración (mg/mL)	Absorbancia	% RSA	IC ₅₀ (mg/mL)
Rep. 1	0	0.696	0.000%	26.99
	10	0.552	20.690%	
	20	0.428	38.506%	
	30	0.264	62.069%	
	40	0.158	77.299%	
	50	0.051	92.672%	
	60	0.040	94.253%	
Rep. 2	0	0.696	0.000%	26.96
	10	0.558	19.828%	
	20	0.430	38.218%	
	30	0.265	61.925%	
	40	0.158	77.299%	
	50	0.045	93.534%	
	60	0.039	94.397%	
Rep. 3	0	0.696	0.000%	27.17
	10	0.562	19.253%	
	20	0.431	38.075%	
	30	0.270	61.207%	
	40	0.161	76.868%	
	50	0.048	93.103%	
	60	0.038	94.540%	
RSA promedio (%)			94.40 ± 0.08	
IC ₅₀ promedio (mg/mL)			27.04 ± 0.07	

Nota: RSA: Actividad de eliminación de radicales. IC₅₀: Concentración inhibidora media

Figura 25:

Inhibición del radical DPPH frente al aceite de semilla de sandía.



Nota: Comparativa de la inhibición de radicales DPPH frente a los antioxidantes presentes en los aceites de semilla extraídos por prensado en frío y Soxhlet.

El análisis de la actividad antioxidante de los aceites obtenidos por los métodos de extracción muestra que el aceite extraído por método Soxhlet presenta un mayor porcentaje de inhibición del radicales DPPH ($94,40 \pm 0,08 \%$) en comparación con el aceite obtenido mediante prensado en frío ($54,89 \pm 0,17 \%$) a concentración de 60 mg/mL. Esta diferencia sugiere que el método de extracción influye en la preservación de los compuestos antioxidantes presentes en el aceite.

Tabla 16:

Capacidad antioxidante de los aceites por prensado en frío y Soxhlet.

	RSA (%) a 60 mg/mL	IC ₅₀ (mg/mL)
Prensado en Frío	54.89 ± 0.17	52.26 ± 0.08
Soxhlet	94.40 ± 0.08	27.04 ± 0.07

Según los resultados obtenidos en la Tabla 16, la concentración estimada del extracto metanólico del aceite extraído por Soxhlet para inhibir el 50% de radicales DPPH es de $27,04 \pm 0,07$ mg/mL, mientras que el extracto por prensado en frío es $52,26 \pm 0,08$ mg/mL. La extracción Soxhlet emplea hexano como solvente, lo que permite recuperar una mayor cantidad de compuestos fenólicos y antioxidantes solubles. Además, este método puede extraer compuestos lipídicos y bioactivos, los cuales pueden influir en el porcentaje de inhibición de radicales DPPH. En cambio, el prensado en frío, al no utilizar solventes, puede extraer una menor cantidad de estos compuestos antioxidantes.

Estos resultados concuerdan con investigaciones previas, las cuales indican que los aceites obtenidos por extracción Soxhlet suelen mantener una mayor actividad antioxidante en comparación con aquellos extraídos por métodos mecánicos. En comparación con los resultados obtenidos por Ouassor et al. (2020), para la especie *Citrullus lanatus* L., obtuvieron $51,1 \pm 0,1\%$ de RSA para el aceite extraído por prensado en frío y $82,4 \pm 0,03\%$ de inhibición para el aceite extraído por método Soxhlet (Ouassor, Aqil, Belmafhraoui, & El Hajjaji, 2020).

4.9 Evaluación del mesocarpio como adsorbente de Pb^{2+}

En esta investigación, las concentraciones de Pb^{2+} fueron determinados utilizando un espectrofotómetro de absorción atómica Jarrell-Ash, operando a una longitud de onda de 217 nm, correspondiente a la línea de absorción característica del plomo (Pb^{2+}). Las mediciones se realizaron en el Laboratorio de Espectrometría, ubicado en la Facultad de Ingeniería Geológica, de Minas y Metalúrgica de la Universidad Nacional de Ingeniería.

Esta técnica instrumental posibilitó la cuantificación de la concentración residual de plomo en las soluciones analizadas con elevada sensibilidad y precisión, facilitando así la evaluación de la eficiencia del bioadsorbente propuesto. Se estudiaron los efectos de cuatro variables fundamentales en el proceso de remoción: tiempo de contacto, pH,

dosificación del bioadsorbente y concentración inicial de Pb^{2+} . Cada parámetro fue evaluado de manera individual, con el objetivo de determinar las condiciones óptimas que maximicen la capacidad de remoción del plomo en solución acuosa.

4.9.1 Efecto del tiempo de contacto en la remoción de Pb^{2+}

Los tiempos de contacto a evaluar son 5, 10 y 15 minutos. Se toman alícuotas de 40 mL a pH de 2,2 con una concentración inicial de plomo de 50,10 ppm. Se empleó una dosis fija de 0,4 g de bioadsorbente, lo que equivale a una relación de 10 g/L (gramos de bioadsorbente por litro de solución). Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 17, donde se detallan valores correspondientes a cada intervalo de tiempo.

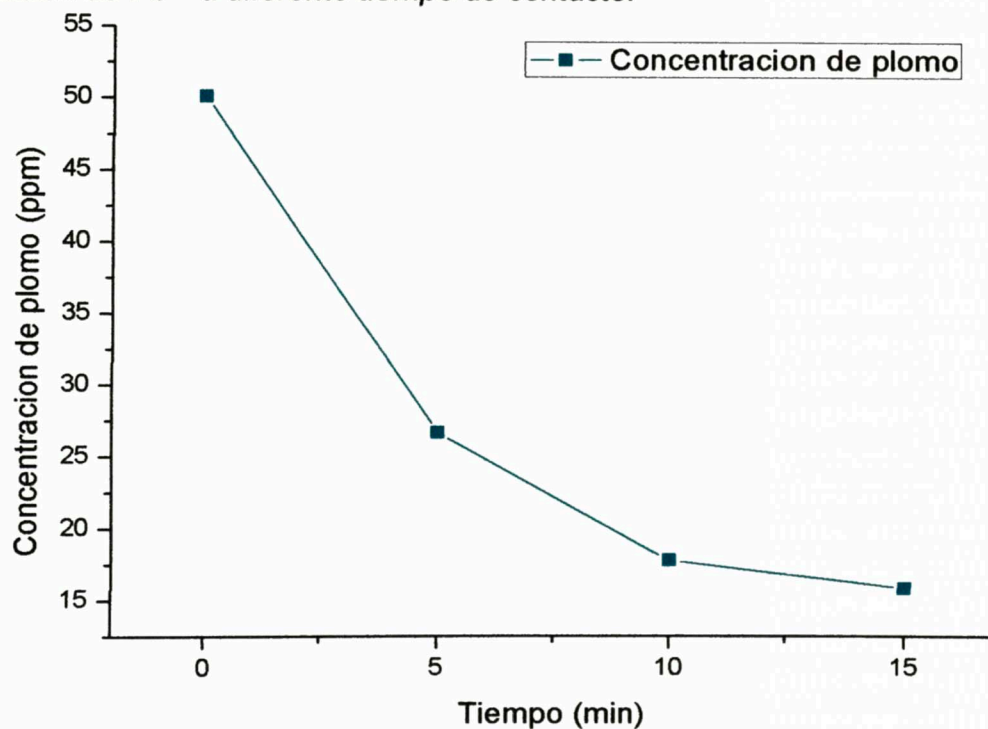
Tabla 17:

Remoción de Pb^{2+} a diferente tiempo y dosis de adsorbente de 10 g/L.

Tiempo (min)	Concentración de plomo (ppm)	Remoción de Pb^{2+} (%)
0	50.10	-
5	26.66	46.79%
10	17.78	64.51%
15	15.86	68.35%

Figura 26:

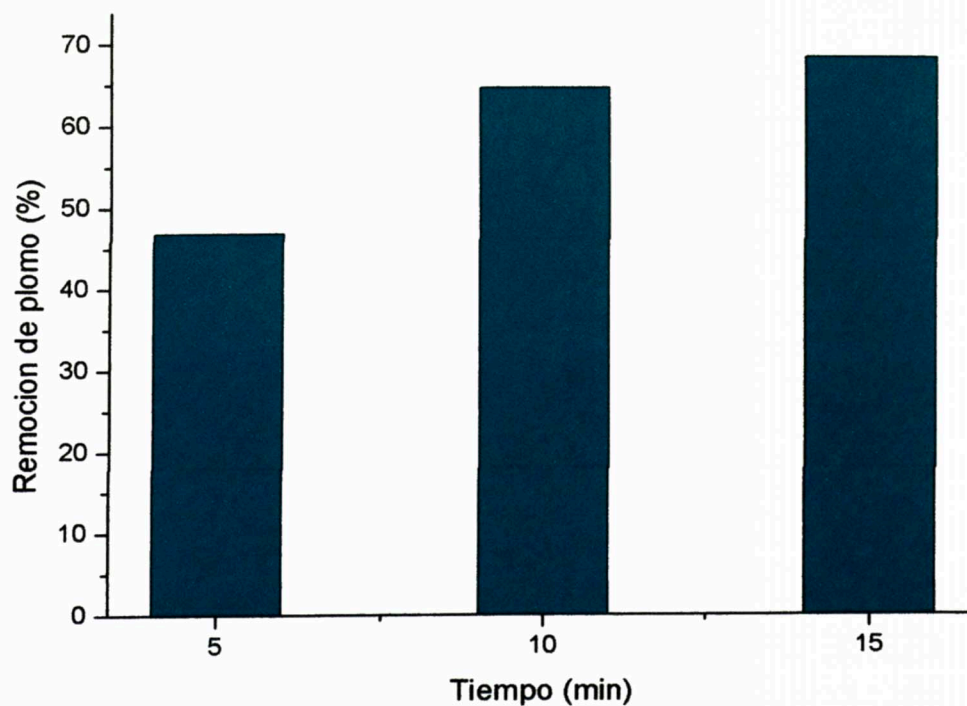
Concentración de Pb^{2+} a diferente tiempo de contacto.



Nota: Ensayos realizados con una concentración inicial de 50 ppm de Pb^{2+} . Elaboración propia.

Figura 27:

Remoción de Pb^{2+} a diferente tiempo de contacto.



Nota: Ensayos realizados a pH de 2,2 y dosis de adsorbente de 10 g/L. Elaboración propia.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se observa que durante los primeros 5 minutos la adsorción es rápida, alcanzando una remoción de plomo de hasta 26,66 ppm, lo que representa el 46,79% del total presente en la solución inicial de 50,10 ppm a pH 2,22. En la Figura 26 se observa la evolución temporal de la concentración de plomo. Además, tal como se muestra en la Figura 27, a los 15 minutos la capacidad de adsorción se incrementa, alcanzando una remoción del 68,35% y una concentración de plomo de 15,86 ppm.

4.9.2 Efecto del pH en la remoción de Pb^{2+}

Para evaluar el efecto del pH, se prepararon soluciones de aproximadamente 50 ppm de contenido de Pb^{2+} . El pH de las soluciones fueron ajustados a valores de 2,2; 3,3 y 5,6 mediante la adición controlada de HNO_3 3M o NaOH 2N, según correspondiera. De cada solución se tomaron alícuotas de 40 mL, a las cuales se añadieron 0,4 g del bioadsorbente previamente acondicionado. La mezcla fue agitada por 20 segundos y se dejó en reposo por tiempos de contacto de 5, 10 y 15 minutos. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 18, donde se detallan valores de las concentraciones a través del tiempo correspondientes a cada valor de pH establecido.

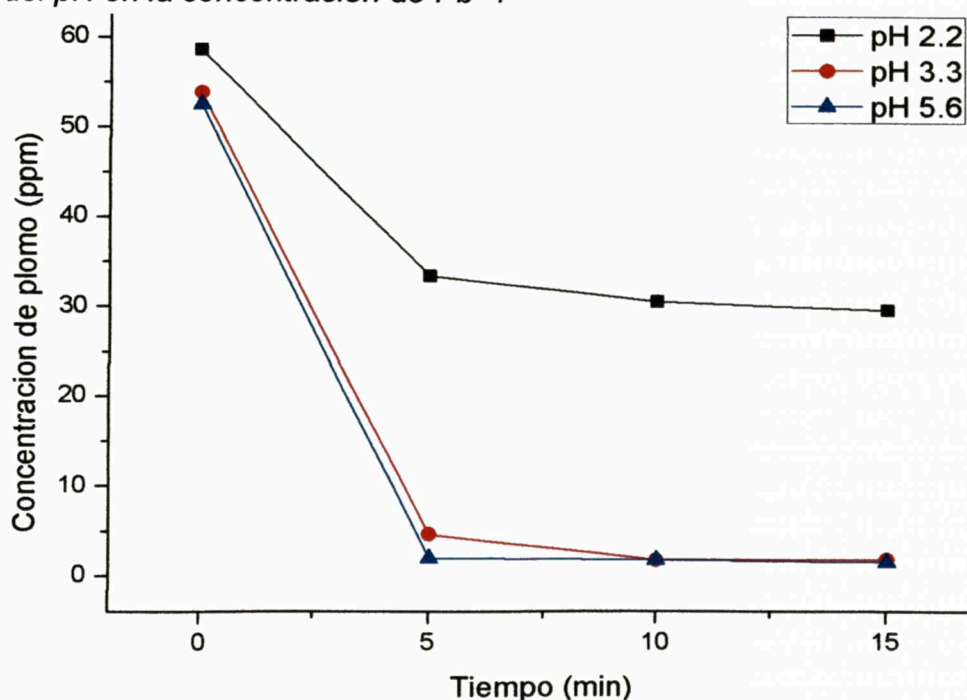
Tabla 18:

Adsorción de Pb^{2+} a diferente pH y dosis de adsorbente de 10 g/L.

Tiempo (min)	Concentración de plomo (ppm)		
	pH 2.2	pH 3.3	pH 5.6
0	58.60	53.89	52.57
5	33.39	4.62	2.01
10	30.56	1.73	1.73
15	29.68	1.78	1.55

Figura 28:

Influencia del pH en la concentración de Pb^{2+} .



Nota: Ensayos realizados a pH 2,2, 3,3 y 5,6 y dosis de adsorbente de 10 g/L. Elaboración propia.

La Figura 28 muestra una gráfica que representa cómo varía la concentración de plomo con el tiempo, a diferentes niveles de pH. Los resultados obtenidos para la remoción de plomo en función del tiempo y del pH se presentan en la Tabla 19. Estos resultados fueron analizados a partir de las concentraciones residuales de plomo determinadas en cada muestra. Con base a estos datos, se calcularon los porcentajes de remoción de plomo a pH 2,2; 3,3 y 5,6.

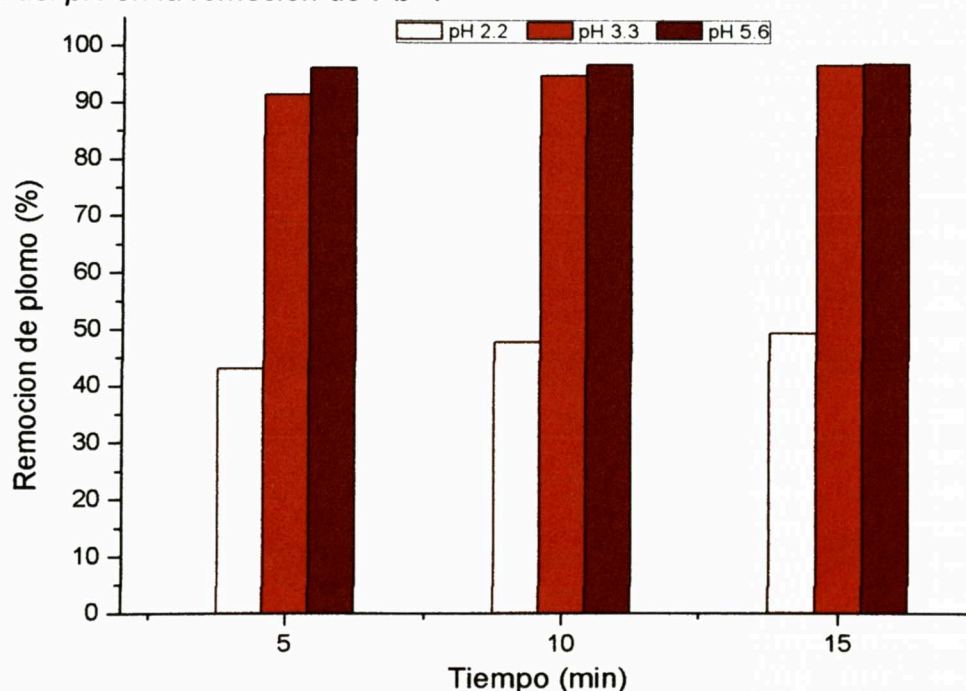
Tabla 19:

Remoción de Pb^{2+} a diferente pH y dosis de adsorbente de 10 g/L.

Tiempo (min)	Remoción de Pb^{2+} (%)		
	pH 2.2	pH 3.3	pH 5.6
5	43.03%	91.43%	96.18%
10	47.86%	96.79%	96.71%
15	49.36%	96.71%	97.05%

Figura 29:

Influencia del pH en la remoción de Pb^{2+} .



Nota: Ensayos realizados a pH 2,2, 3,3 y 5,6 y dosis de adsorbente de 10 g/L. Elaboración propia.

Es conocido que el pH es una variable importante en el proceso de adsorción de iones metálicos con adsorbentes. Según los resultados, se observa que se produjo poca adsorción de plomo a pH 2,2 con 49,36% a los 15 minutos, en comparación con la adsorción a pH 3,3 y 5,6 que reportaron 96,71% y 97,05%, respectivamente para el mismo tiempo de contacto y una concentración de plomo de aproximadamente 50 ppm. En la Figura 29 se ilustra de manera comparativa la influencia del pH a diferente tiempo de contacto. La baja sorción del metal a pH 2,2 se atribuye a la elevada concentración de iones H^+ en el medio, que provoca la protonación de los sitios activos del bioadsorbente y genera una fuerte competencia con los iones Pb^{2+} , lo que reduce la disponibilidad de estos sitios para la retención del metal.

El análisis espectroscópico FT-IR mostrado en la Figura 32 , permitió identificar los principales grupos funcionales presentes en la superficie del bioadsorbente que están involucrados en el proceso de adsorción. Entre ellos están los grupos hidroxilo ($-OH$),

carboxilo (-COOH) y carbonilo (C=O) quienes forman enlaces iónicos y de coordinación con el ion Pb^{2+} . A pH muy ácido, estos grupos tienden a protonarse, lo que disminuye la carga negativa superficial del bioadsorbente y reduce atracción electrostática hacia los iones de Pb^{2+} . En consecuencia, la eficiencia de remoción de Pb^{2+} aumenta a pH ligeramente ácidos (pH<6) que puede apreciarse, ya que a menor concentración de H^+ favorece la interacción entre los grupos funcionales del bioadsorbente y el metal. Además, en este rango de pH no se forman precipitados de $Pb(OH)_2$ que puedan interferir con el proceso de adsorción, como se observa en la Figura 12 del diagrama de especiación del plomo en función de pH.

4.9.3 Efecto de la concentración inicial de Pb^{2+} en la bioadsorción.

Con el objetivo de evaluar el efecto de la concentración inicial de Pb^{2+} en el proceso de bioadsorción, se prepararon soluciones con concentraciones aproximadas de 25, 50, 75 y 100 ppm. De cada solución se tomaron alícuotas de 40 mL, las cuales fueron ajustadas a un pH promedio de 2,6. A cada muestra se añadieron 0,4 g del bioadsorbente, manteniendo un tiempo de residencia constante de 15 minutos para todas las pruebas. Las mezclas fueron agitadas por 20 segundos y se dejaron en reposo por el tiempo establecido. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 20, donde se detallan las concentraciones iniciales y finales de Pb^{2+} en la solución, así como los porcentajes de remoción correspondientes después de 15 minutos de contacto con el bioadsorbente a un pH promedio de 2,6.

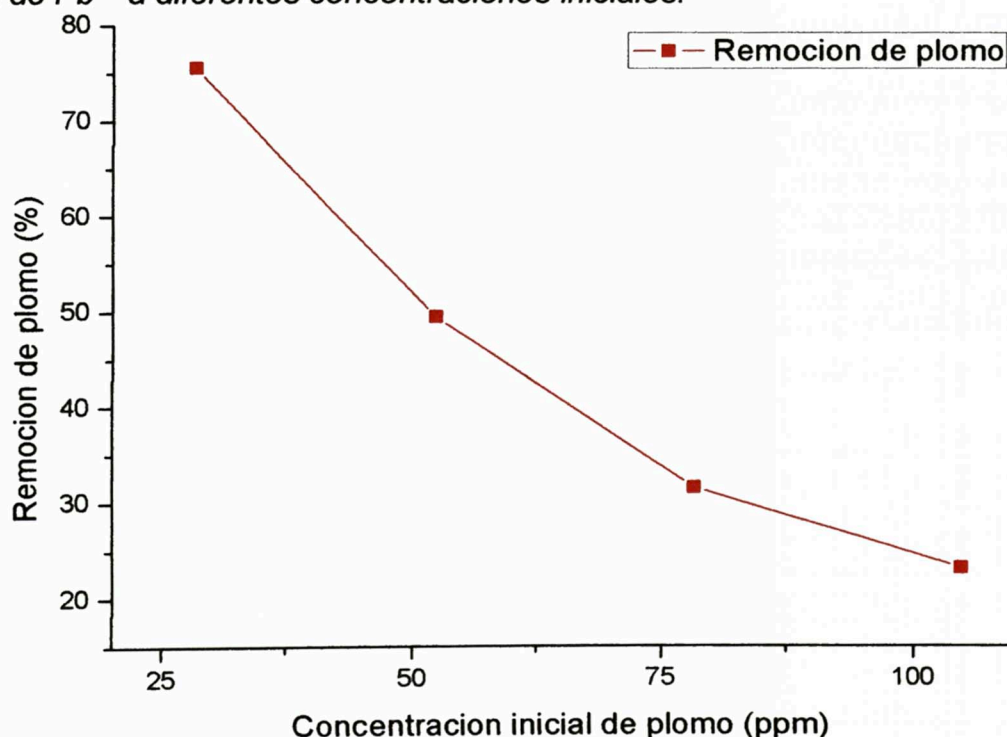
Tabla 20:

Remoción de Pb^{2+} a diferentes concentraciones iniciales.

pH	Concentración de plomo (ppm)		Remoción de Pb^{2+} (%)	qt (mg/g)
	0 min	15 min		
2.70	28.37	6.93	75.57%	2.14
2.60	52.27	26.42	49.46%	2.59
2.60	78.20	53.49	31.60%	2.47
2.60	104.72	80.48	23.15%	2.42

Figura 30:

Remoción de Pb^{2+} a diferentes concentraciones iniciales.



Nota: Ensayos realizados a pH de 2,6 y diferentes concentraciones iniciales de plomo. Elaboración propia.

Según los resultados obtenidos, se puede observar que el incremento en la concentración inicial de Pb^{2+} provoca una disminución en la eficiencia de remoción por parte del bioadsorbente. En los ensayos realizados, cuando la concentración inicial fue de 28,37 ppm de Pb^{2+} , se logró remover hasta un 75,57% del total de plomo presente en la solución. Por otro lado, para una concentración de 104,72 ppm, la remoción de plomo descendió a 23,15%. Este comportamiento ilustrado en la Figura 30, indica una saturación progresiva de los sitios activos del bioadsorbente, lo que reduce la eficiencia relativa de adsorción. Por ello, es necesario calcular la cantidad de plomo absorbido por gramo de

bioadsorbente (q_t), ya que permite cuantificar la capacidad de retención del adsorbato frente al contaminante.

Al observar los valores de q_t en la Tabla 20, se puede notar que la cantidad de Pb^{2+} absorbida por gramo de bioadsorbente se estabiliza alrededor de 2,4 mg/g, lo que sugiere que el bioadsorbente está alcanzando su máxima capacidad de adsorción.

4.9.4 Efecto del dosaje de bioadsorbente en la remoción de Pb^{2+} .

Para analizar la influencia de la dosis del bioadsorbente en la remoción de plomo, se prepararon soluciones sintéticas con una concentración inicial aproximada de 50 ppm de Pb^{2+} , ajustadas a un pH de 2,5. A partir de estas soluciones, se tomaron alícuotas de 40 mL, donde a las cuales se añadieron 0,1 y 0,4 g de bioadsorbente, correspondientes a relaciones masa/volumen de 2,5:1 y 10:1 g/L por alícuota, respectivamente. Las mezclas fueron agitadas inicialmente durante 20 segundos y se dejaron en reposo por tiempos de contacto de 5, 10 y 15 minutos. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 21, donde se detalla para cada tiempo de contacto, la concentración remanente de plomo en solución y el correspondiente porcentaje de remoción.

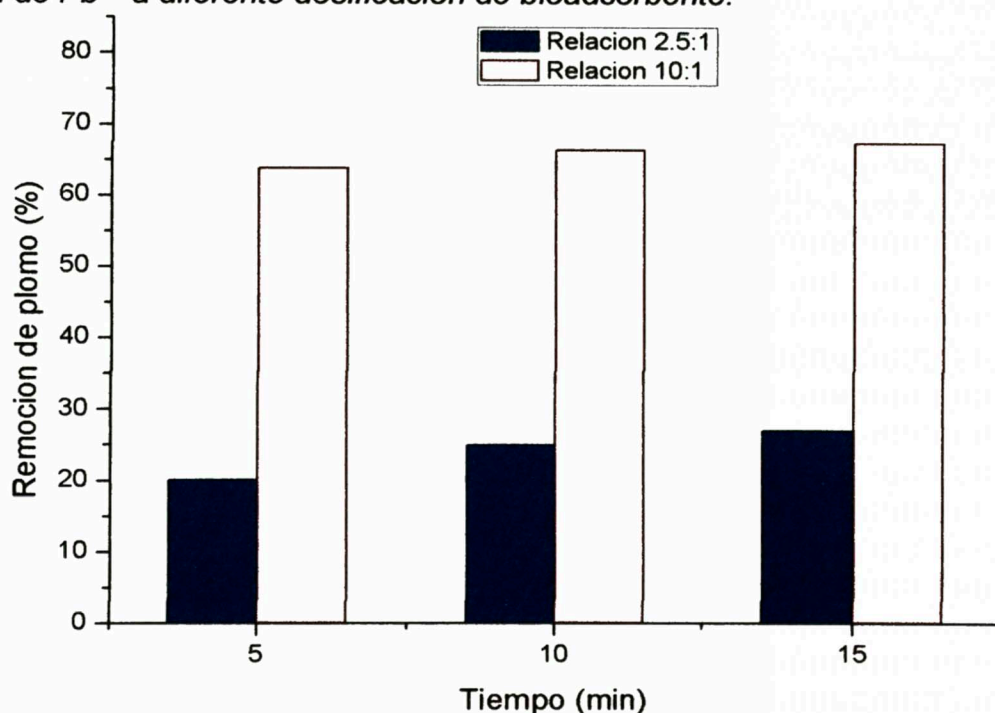
Tabla 21:

Efecto del dosaje de bioadsorbente en la remoción de plomo en solución.

Relación (g/L)	Tiempo (min)	Concentración de	Remoción de	q_t (mg/g)
		Pb (ppm)	Pb (%)	
2.5 : 1	0	49.1	-	-
	5	39.25	20.06%	3.94
	10	36.87	24.91%	4.892
	15	35.83	27.03%	5.308
10 : 1	0	49.1	-	-
	5	17.78	63.79%	3.132
	10	16.53	66.33%	3.257
	15	15.99	67.43%	3.311

Figura 31:

Remoción de Pb^{2+} a diferente dosificación de bioadsorbente.



Nota: Ensayos realizados a un pH de 2,5 y concentración inicial de 50 ppm de Pb^{2+} . Elaboración propia.

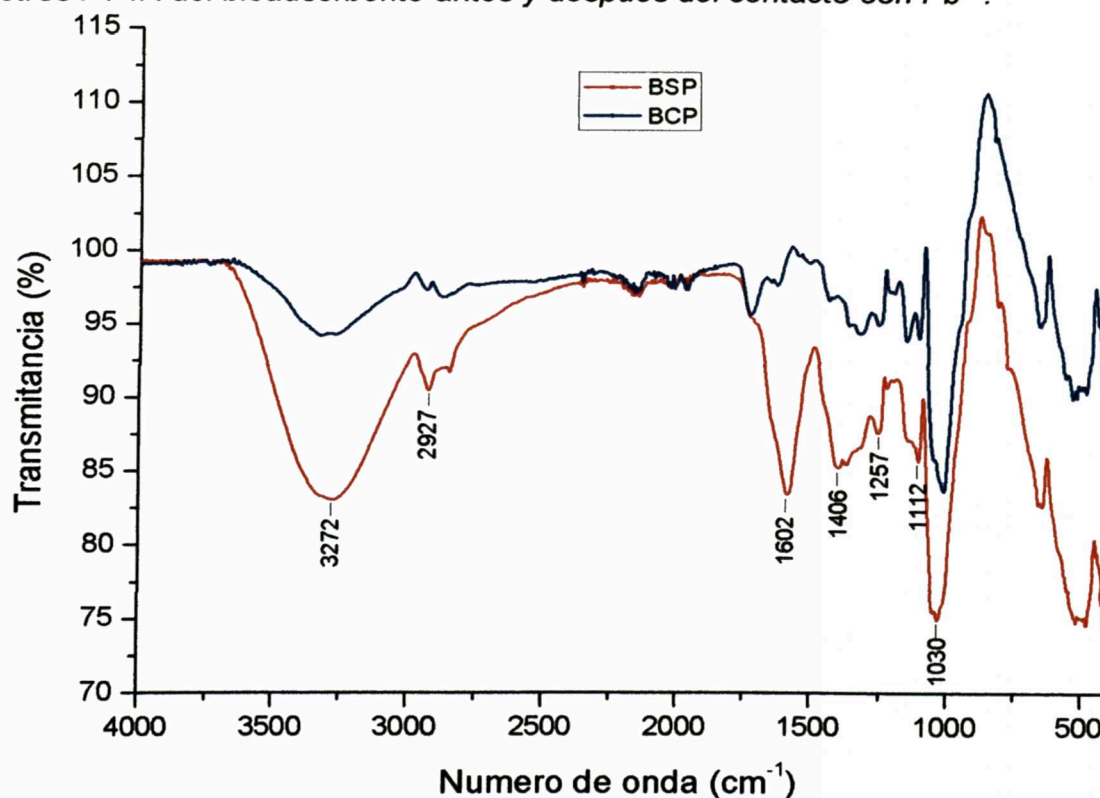
Según los resultados obtenidos en la Tabla 21 y lo visualizado en la Figura 31, para la relación 2,5:1 g/L (0,1 g de bioadsorbente en 40 mL de solución de plomo) la remoción de Pb^{2+} aumentó progresivamente con el tiempo, desde un 20,06% a los 5 minutos hasta un 27,03% a los 15 minutos. También, se observa que la cantidad de plomo adsorbido por gramo de bioadsorbente (q_t) aumenta progresivamente de 3,94 a 5,31 mg/g mostrando que cada gramo de bioadsorbente está capturando más iones Pb^{2+} . Para la relación 10:1 g/L (0,4 g de bioadsorbente en 40 mL de solución de plomo), la remoción aumentó, alcanzando un 63,79% en solo 5 minutos y 67,43% a los 15 minutos. Por otro lado, el valor de q_t se mantuvo relativamente estable, lo que sugiere que, aunque se pudo remover más Pb^{2+} , la cantidad adsorbida por cada gramo del bioadsorbente fue menor.

4.10 Caracterización por FT-IR del bioadsorbente

En la adsorción de plomo (Pb^{2+}) se emplea el mesocarpio de sandía (*Citrullus lanatus* L.) previamente triturado, con el propósito de incrementar el área disponible para el contacto entre el bioadsorbente y los iones de plomo presentes en la solución. El patrón de sorción de iones metálicos en materiales vegetales está estrechamente relacionado con la presencia de grupos funcionales activos en su estructura química (Lakshmipathy & Sarada, 2015). Por lo tanto, en la Figura 32 se muestran los espectros FT-IR del bioadsorbente de mesocarpio de sandía antes (BSP) y después (BCP) del proceso de adsorción de plomo a fin de evidenciar la participación de determinados grupos funcionales en la remoción del metal pesado. El análisis se realizó utilizando un espectrómetro FT/IR-4X – JASCO, en el rango de 400 a 4000 cm^{-1} , en el laboratorio de servicios a terceros de la Facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Ingeniería.

Figura 32:

Espectros FT-IR del bioadsorbente antes y después del contacto con Pb^{2+} .



Nota: BSP: Bioadsorbente sin plomo, BCP: Bioadsorbente con plomo.

En la Figura 32, el pico amplio e intenso alrededor de 3272 cm^{-1} del BSP, corresponde a vibraciones de estiramiento del grupo hidroxilo ($-\text{OH}$) presentes en celulosa, pectina y lignina (Zapata et al., 2009). La disminución de este pico en el BCP indica la participación de estos grupos en el proceso de adsorción. De manera similar, alrededor del pico en 2927 cm^{-1} se atribuye a vibraciones de estiramiento asimétrico de los enlaces ($-\text{CH}$) de grupos metilo ($-\text{CH}_3$) y metoxi ($-\text{OCH}_3$). La banda a 1602 cm^{-1} corresponde a vibraciones de los enlaces ($-\text{C}=\text{O}$) y ($-\text{C}=\text{C}$) de los grupos carboxilo o aromáticos, así como a deformaciones del grupo amino ($-\text{NH}_2$) en aminas primarias. En el espectro del BCP, esta banda sufre desplazamiento y disminución de intensidad, lo que sugiere la formación de complejos entre Pb^{2+} y grupos carbonilos o carboxilos presentes en la matriz del bioadsorbente. La banda observada en 1406 cm^{-1} se atribuye a flexiones de los enlaces ($-\text{CH}$), tales como grupo metileno ($-\text{CH}_2$) y metilo ($-\text{CH}_3$). Las bandas observadas entre el rango de 1300 a 900 cm^{-1} indican estiramientos de enlaces ($-\text{C}-\text{O}$) y estiramientos antisimétricos de ($-\text{C}-\text{O}-\text{C}$) asociados a ésteres, éteres y lactonas (Wanja et al., 2016). En conjunto, el espectro FT-IR del mesocarpio de sandía indica una abundante presencia de grupos hidroxilos y carboxílicos, los cuales, al actuar como donadores de protones, son clave en la interacción con cationes metálicos como el Pb^{2+} durante el proceso de adsorción.

Capítulo V. Proyección de Ingeniería

El presente diseño de ingeniería plantea una solución para la remoción de iones plomo (Pb^{2+}) en aguas contaminadas mediante el uso de un bioadsorbente elaborado a partir del mesocarpio de sandía (*Citrullus lanatus* L.). El sistema combina operaciones de preparación del bioadsorbente, acondicionamiento del agua contaminada y tratamiento por adsorción en lecho fijo, con el objetivo de obtener agua apta para usos agroindustriales, especialmente para riego.

5.1 Procedimiento del proceso de bioadsorción en planta piloto

5.1.1 Acondicionamiento del agua contaminada

El acondicionamiento del agua contaminada con plomo representa una etapa preliminar esencial para asegurar la eficiencia del proceso de bioadsorción. Esta fase tiene como objetivo estabilizar y ajustar las condiciones fisicoquímicas del agua antes de su contacto con el bioadsorbente, a fin de optimizar la interacción entre los iones Pb^{2+} y los sitios activos del material adsorbente. Según los resultados obtenidos en el desarrollo experimental en la Tabla 19, se observó que el mejor rendimiento de adsorción se alcanza cuando el pH del medio se encuentra en un rango entre 3 y 6. En caso el pH del medio no se encuentre en este rango, se ajusta con HCl 0,1 M y NaOH 0,1M, según corresponda (Lakshmipathy & Sarada, 2015), y la mezcla se mantiene en agitación constante para asegurar una adecuada homogenización.

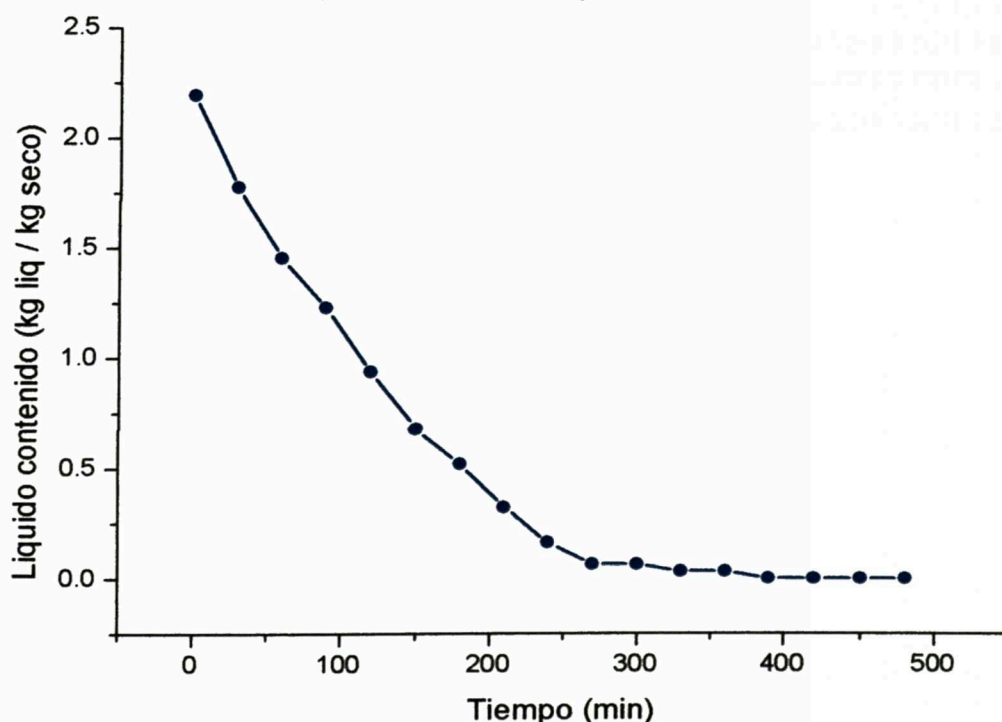
5.1.2 Preparación del bioadsorbente

En la etapa inicial del proceso, el mesocarpio de sandía, recolectado como residuo en estado crudo, es sometido a una extracción mecánica mediante una extractora de jugo. Para estimar el rendimiento de este equipo en la remoción de humedad, se realizó una simulación comparativa utilizando una prensa hidráulica Carl Zeiss Jena DDR, operando a

presiones variables de hasta 10 bar (Figura 19a). A partir de esta comparación, se determinó que la extractora de jugo podría remover aproximadamente el 75 % del contenido de humedad original presente en el mesocarpio. Posteriormente, el material parcialmente deshidratado es transferido a un horno de secado a 65 °C, donde se elimina la humedad remanente. La Figura 33 muestra la curva de secado para la determinación del tiempo requerido en donde se alcanza una mínima humedad residual (<5%). Tras un tiempo aproximado de 8 horas, se alcanza una reducción total del 92 % de la humedad inicial.

Figura 33:

Curva de secado del mesocarpio de sandía después de la extrusión



Nota: Después de la extracción mecánica del contenido líquido del mesocarpio de sandía, se procede al secado del bioadsorbente a una temperatura aproximada de 65 °C. Elaboración propia.

5.1.3 Adsorción a lecho fijo

De acuerdo con el diagrama de procesos de la Figura 34, el agua contaminada con iones Pb^{2+} es conducida hacia el sistema de tratamiento por adsorción en lecho fijo. En paralelo, el bioadsorbente previamente secado, es colocado en el interior del tanque abierto superior, empacado en unidades permeables tipo costal. Este formato de empaque facilita

la manipulación y retiro del material adsorbente al finalizar el tratamiento, sin interferir significativamente en el flujo del agua ni en la eficiencia de adsorción.

De acuerdo con la tabla 21, se determinó que una relación de 10 g/L de bioadsorbente por litro de agua contaminada permite una remoción más eficiente de los iones plomo disueltos. Asimismo, se definió un tiempo de contacto mínimo de 15 minutos, suficiente para permitir una interacción efectiva entre el contaminante y los sitios activos del mesocarpio de sandía, favoreciendo así el proceso de adsorción y mejorando el rendimiento general del sistema.

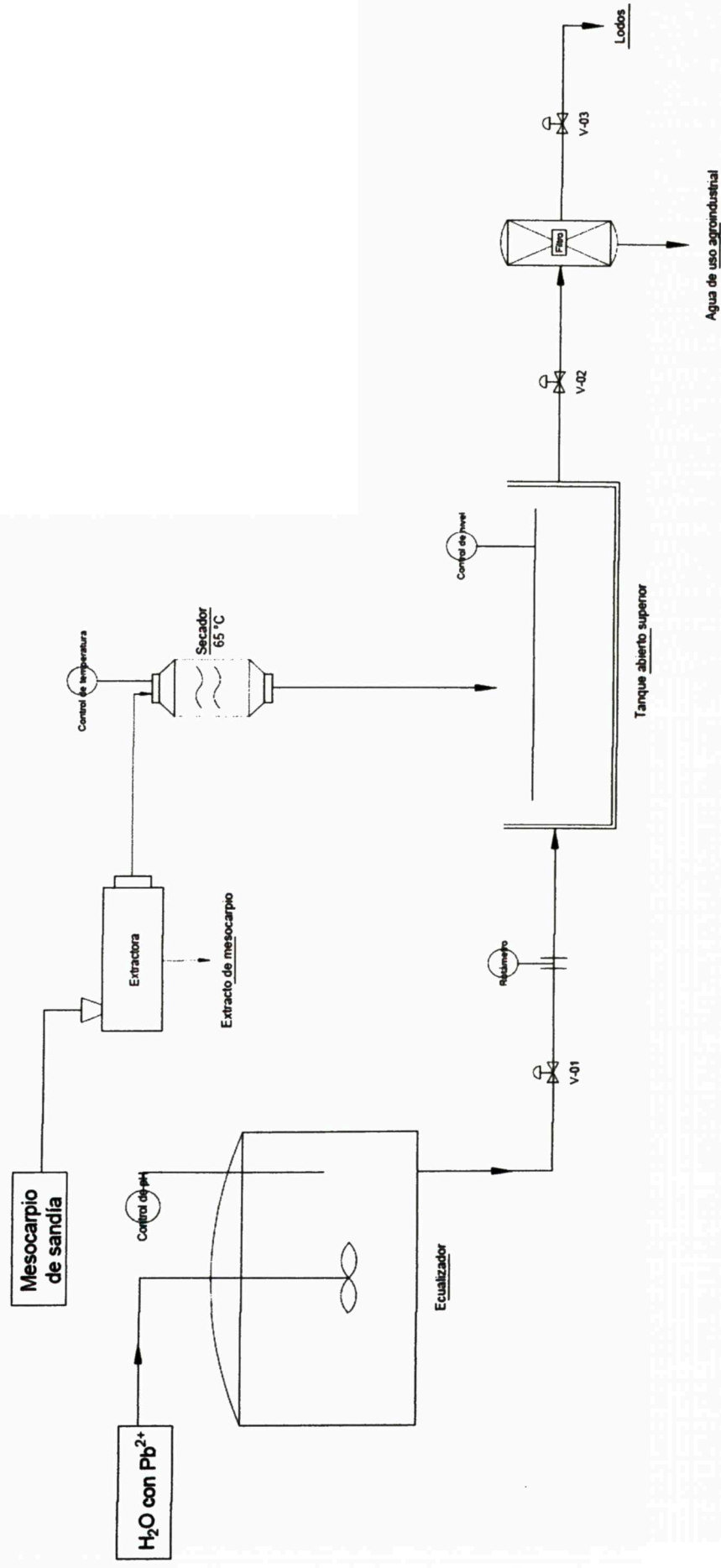
5.1.4 Manejo del efluente tratado

Finalizado el proceso de adsorción en lecho fijo, el agua tratada es dirigida hacia una etapa de filtración final, con el propósito de eliminar cualquier resto sólido proveniente del bioadsorbente o del flujo del tratamiento. Esta filtración actúa como una barrera física, permitiendo obtener un efluente libre de impurezas visibles. El agua filtrada se conduce por gravedad donde queda lista para su aplicación agroindustrial. Este uso puede incluir actividades como riego, limpieza de áreas no críticas o enfriamiento, mientras se mantengan dentro de los estándares de calidad requeridos.

En paralelo, los residuos sólidos generados, tales como, partículas del bioadsorbente y lodos acumulados, son retirados manualmente y almacenados de forma controlada. Estos materiales pueden ser evaluados para una posible disposición segura o aprovechamiento alternativo, como compostaje, dependiendo de su nivel de contaminación residual.

Figura 34:

Diagrama de flujo del proceso



Nota: Elaboración propia. Escalamiento a nivel piloto.

5.2 Balance de materia del proceso de bioadsorción

El proceso de tratamiento de efluentes contaminados con iones plomo mediante bioadsorción con mesocarpio de sandía se caracteriza por tener un flujo continuo de materia, sin generación ni consumo de masa dentro del sistema. El efluente ingresante presenta una concentración inicial de Pb de X mg/L y atraviesa operaciones unitarias como extracción, secado y adsorción, sin reacciones químicas significativas. Durante la operación, el mesocarpio actúa como adsorbente, reteniendo los iones metálicos, mientras que la masa total del sistema se conserva en cada etapa, permitiendo aplicar de manera directa el balance de materia. Las condiciones de operación, incluyendo el pH, temperatura y tiempo de contacto, se controlan cuidadosamente para maximizar la eficiencia de remoción y garantizar la consistencia del balance de masa.

$$\textit{Entrada} + \textit{Generación} = \textit{Salida} + \textit{Consumo} + \textit{Acumulación} \quad (10)$$

Dado que se trata de un sistema de operación por lotes, en estado estacionario y sin reacciones químicas involucradas, no existe ni generación, ni consumo, ni acumulación, por lo que la ecuación se reduce a:

$$\textit{Entrada} = \textit{Salida} \quad (11)$$

En este sistema, la masa se conserva en cada etapa del proceso. En la Tabla 22 se muestran los principales parámetros operacionales y el balance de masa considerados en el proceso de bioadsorción por lote.

Tabla 22:*Parámetros operacionales y balance de masa en la bioadsorción por lote.*

Sección	Parámetro	Magnitud
Parámetros generales	Concentración inicial de Pb^{2+}	10 mg/L
	Relación bioadsorbente:agua	10 g/L
	Humedad eliminada en la extractora	75 %
	Humedad eliminada en el secado	92 %
	Eficiencia de remoción de Pb^{2+}	96 %
Requerimientos del proceso	Caudal de agua contaminada	20 m ³ /lote
	Masa fresca de mesocarpio	2000 kg/lote
Extracción	Agua eliminada en la extractora	1500 kg/lote
	Pulpa húmeda enviada al secado	500 kg/lote
Secado	Agua eliminada en el horno de secado	340 kg/lote
	Bioadsorbente seco	160 kg/lote
Bioadsorción	Plomo total en agua contaminada	200 g/lote
	Plomo removido	192 g/lote
	Plomo residual	8 g/lote
	Concentración final de Pb^{2+} en agua tratada	0.4 mg/L

Nota: Los rendimientos y cantidades de remoción de plomo se basan en resultados obtenidos en condiciones de laboratorio, con pH controlado (2,2 – 5,6) y tiempo de contacto de 15 minutos.

5.3 Especificaciones técnicas de los equipos

Esta sección detalla las características técnicas más relevantes de los equipos utilizados en el tratamiento de agua contaminada con plomo (Pb^{2+}), donde se utiliza mesocarpio de sandía como bioadsorbente. Este proceso, representado en la Figura 34, incluye operaciones como extracción, secado, filtración y control de variables clave, y cada equipo ha sido seleccionado por su aporte a la eficiencia y sostenibilidad del sistema.

Tabla 23:

Especificación técnica del tanque abierto superior

Parámetro	Especificación	Equipo
Nombre del equipo	Tanque abierto superior	
Forma	Rectangular	
Capacidad total	24 m³	
Dimensiones	4 m x 3 m x 2 m	
Material principal	Concreto armado	
Revestimiento interno	Geomembrana DHPE (1.5 mm)	
Espesor de paredes	12 cm	
Drenaje	Válvula de fondo (PVC)	
Accesorios adicionales	Escalera externa, medidor de nivel	

Nota: Adaptado de (Ecoterra, 2025).

Tabla 24:

Especificación técnica del tanque de mezcla con agitador

Parámetro	Especificación	Equipo
Nombre del equipo	Tanque de mezcla con agitador	
Modelo/tipo	Mezclador de paletas (Paddle mixer)	
Capacidad	20000 L	
Velocidad de agitación	36 - 2900 rpm	
Potencia	0.75 kW (Motor de agitación)	
Dimensiones	Φ2.5m x 3.8 m	
Sistema de raspado	Paletas de teflón	
Peso del equipo	1800 kg	
Material de fabricación	Acero inoxidable SUS304	

Nota: Adaptado de (Alibaba, 2025).

Tabla 25:

Especificación técnica del extractor de jugo de frutas y vegetales

Parámetro	Especificación	Equipo
Nombre del equipo	Extractor de jugo de frutas y vegetales	
Modelo/tipo	Goldenshell Industrial	
Capacidad	Hasta 500 kg/h	
Dimensiones	0.78 m x 0.32 m x 0.89 m	
Potencia instalada	1.5 kW	
Diámetro del tornillo	88 mm	
Velocidad del tornillo	380 rpm	
Peso	85 kg	
Material de fabricación	Acero inoxidable 304	

Nota: Adaptado de (Alibaba, 2025).

Tabla 26:

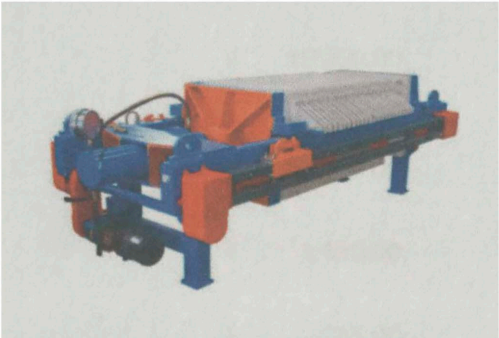
Especificación técnica del horno de secado

Parámetro	Especificación	Equipo
Nombre del equipo	Horno de secado de aire caliente	
Modelo/tipo	CT-IV	
Capacidad de secado	Hasta 480 kg/lote	
Dimensiones	4.46 m x 2.2 m x 2.62 m	
Potencia instalada	4 kW (ventilador)	
Volumen de aire	98000 m ³ /h	
Área de calentamiento	480 m ²	
Número de bandejas	192	
Material de fabricación	Acero inoxidable AISI 304	

Nota: Adaptado de (Alibaba, 2025).

Tabla 27:

Especificación técnica del filtro prensa manual

Parámetro	Especificación	Equipo
Nombre del equipo	Filtro prensa manual	
Modelo/tipo	Con placas	
Tamaño de placas	320 mm x 320 mm	
Cantidad de placas	15	
Presión de operación	Hasta 0.6 Mpa	
Caudal de tratamiento	800-1500 L/h	
Peso del equipo	250 kg	
Área de filtración	5 m²	
Material de fabricación	Polipropileno (placas)	

Nota: Adaptado de (Alibaba, 2025).

5.4 Costo de equipos

La presente proyección económica se centra en la estimación del costo de los equipos requeridos para la implementación de una planta piloto de tratamiento de aguas contaminadas mediante bioadsorción de plomo, utilizando mesocarpio de sandía como bioadsorbente. El alcance económico considera específicamente la estimación de costos de equipamiento esencial para el proceso. Esta proyección no contempla indicadores financieros como la TIR, VAN o análisis de flujos de caja, dado que la investigación tiene un enfoque de carácter ingenieril y experimental. El estudio se centra en la factibilidad técnica demostrada a nivel de laboratorio, priorizando el desarrollo de soluciones sostenibles para el tratamiento de aguas con presencia de plomo.

La valoración económica de los equipos se basa en los presentados en el diagrama de proceso de la Figura 34. En la Tabla 28, los costos de los equipos se basan en cotizaciones referenciales provenientes del mercado internacional, con precios actualizados de proveedores industriales, lo que permite obtener una aproximación válida del valor de adquisición e instalación de los componentes esenciales.

Tabla 28:**Costo total de equipos**

Equipo	Descripción técnica	Cantidad	Precio (USD)
Tanque abierto superior	24 m ³ de concreto y con geomembrana HDPE (1.5 mm)	1	\$ 4,500.00
Tanque de mezcla con agitador	20 m3 con agitador central	1	\$ 15,000.00
Extractor de jugo de mesocarpio	Extractor de 500 kg/h	1	\$ 950.00
Horno de secado	480 kg/lote a 65 °C	1	\$ 3,500.00
Filtro prensa manual	Tratamiento de caudal de hasta 1500 L/h	1	\$ 1,120.00
Rotámetro	1 HP, caudal 5m ³ /h	1	\$ 135.00
Válvulas de bola PVC	Φ2"	3	\$ 250.00
Sensores	pH, nivel, temperatura	3	\$ 285.00
Costo total de equipos			\$ 25,740.00

Nota: Valores referenciales de equipos cotizados en (Alibaba, 2025).

Conclusiones

- El rendimiento obtenido mediante prensado en frío ($14,57 \pm 0,74\%$) fue inferior al alcanzado por extracción por Soxhlet ($27,70 \pm 0,56\%$). Las diferencias encontradas respecto a otras investigaciones pueden deberse a factores operativos, características de la semilla o condiciones específicas del experimento.
- Los ácidos grasos con mayor presencia en el aceite de semilla de sandía son el ácido linoleico, palmítico, oleico y esteárico, en ese orden, presentando un perfil lipídico rico en ácidos grasos insaturados ($\approx 79\%$), con potencial valor nutricional e industrial.
- El contenido total de compuestos polifenólicos y la capacidad antioxidante dependieron del método de extracción, presentando valores superiores en el aceite obtenido por Soxhlet en comparación con el extraído mediante prensado en frío.
- De acuerdo con la caracterización del mesocarpio de *Citrullus lanatus* L. mediante espectroscopía FT-IR, se identificó la participación de grupos hidroxilo, carboxilo y amino, los cuales están involucrados en el proceso de adsorción de iones Pb^{2+} en solución acuosa, actuando como sitios activos de unión entre la superficie del adsorbente y los cationes metálicos.
- El mesocarpio de *Citrullus lanatus* L. demostró una alta capacidad de remoción de iones Pb^{2+} en solución acuosa, incluso sin modificaciones químicas previas en su estructura. La máxima eficiencia de adsorción se alcanzó con una concentración inicial de Pb^{2+} de 50 ppm aproximadamente, pH de 5,6 y una dosis de adsorbente de 10:1 g/L de solución, alcanzando una remoción del 97% del plomo presente inicialmente en la solución.

Recomendaciones

- Se sugiere que futuras investigaciones incluyan la evaluación de estabilidad y valor nutricional del aceite (acidez, peróxidos, yodo, tocoferoles) con el objetivo de seleccionar el método de extracción más adecuado según la aplicación prevista del aceite.
- Con el objetivo de maximizar la retención de compuestos bioactivos, se recomienda optimizar parámetros del proceso de extracción, temperatura, tiempo y tipo de solvente, con el fin de lograr un equilibrio entre el rendimiento y calidad antioxidante del aceite de semilla.
- Para complementar la caracterización del bioadsorbente, se sugiere realizar un análisis mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), con el objetivo de observar la morfología superficial y porosidad, ya que estas características permiten evaluar la accesibilidad y dimensiones de los sitios activos que intervienen en la adsorción de metales pesados.
- Para futuras investigaciones, se recomienda incluir la temperatura como una variable adicional en los estudios de bioadsorción, ya que esta puede influir significativamente en la eficiencia del proceso. Asimismo, se sugiere desarrollar un modelo cinético ajustado a diferentes condiciones térmicas, con el fin de comprender mejor los mecanismos de adsorción y optimizar la proyección a escala piloto o industrial.

Referencias bibliográficas

- Agnes, M. R., & Penelope, M. P. (2005). Determination of citrulline in watermelon rind. *Journal of Chromatography A*, 1078(1-2), 196-200. doi:10.1016/j.chroma.2005.05.009
- Alibaba. (2025). Obtenido de <https://www.alibaba.com/>
- Arbabi, M., Hemati, S., & Amiri, M. (2015). Removal of lead ions from industrial wastewater: A review of Removal methods. *International Journal of Epidemiologic Research*, 2(2), 105-109.
- Atkins, P., & de Paula, J. (2006). *Physical Chemistry* (Octava ed.). Oxford University Press.
- Aydeniz, B., Güneser, O., & Yilmaz, E. (2014). Physico-chemical, Sensory and Aromatic Properties of Cold Press Produced Safflower Oil. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 91(1). doi:10.1007/s11746-013-2355-4
- Bellary, A. N., Indiramma, A., Prakash, M., Baskaran, R., & Rastogi, N. K. (2016). Anthocyanin infused watermelon rind and its stability during storage. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 33, 554-562. doi:10.1016/j.ifset.2015.10.010
- Bilal Shakoor, M., Khan Niazi, N., Bibi, I., Shahid, M., Sharif, F., Bashir, S., . . . Rinklebe, J. (15 de diciembre de 2018). Arsenic removal by natural and chemically modified water melon rind in aqueous solutions and groundwater. *Science of The Total Environment*, 645, 1444-1455. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.07.218

- Biswas, R., Ghosal, S., Chattopadhyay, A., & Datta, S. (2017). A comprehensive review on watermelon seed oil – an underutilized product. *Journal Of Pharmacy*, 7(1), 01-07.
- Çakaloğlu Ebcim, B., Hazal Ozyurt, V., & Otles, S. (2018). Cold press in oil extraction. A review. *Ukrainian Food Journal*, 7(4), 640-654. doi:10.24263/2304-974X-2018-7-4-9
- Carey, F. A. (2008). *Química orgánica* (Sexta ed., Vol. I). México: McGraw-Hill.
- Casaca, Á. (Abril de 2005). Guías tecnológicas de frutas y vegetales. *Dirección de Ciencia y Tecnología Agropecuaria*.
- Castro Holguin, K. V., & Jacome Calie, M. D. (2022). *Caracterización físico-química del aceite de la semilla de sandía (Citrullus lanatus) y melón (Cucumis melo) usando tres métodos de extracción (prensado en frío, solvente químico y combinado)*. Quevedo, Los Ríos, Ecuador: UNIVERSIDAD TÉCNICA ESTATAL DE QUEVEDO. Obtenido de <https://repositorio.uteq.edu.ec/handle/43000/6886>
- Cerón, A. F., Osorio M, O., & Hurtado B, A. (2012). Identificación de ácidos grasos contenidos en los aceites extraídos a partir de semillas de tres diferentes especies de frutas. *Acta Agronómica*, 61(2), 126-132. Obtenido de <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/70851>
- Cheikhoussef, N., Kandawa-Schulz, M., Böck, R., de Koning, C., Cheikhoussef, A., & Hussein, A. (2017). Characterization of Acanthosicyos horridus and Citrullus lanatus seed oils: two melon seed oils from Namibia used in food and cosmetics applications. *3 Biotech*, 7(5), 297. doi:10.1007/s13205-017-0922-3

- Cheol-Hyum, K., Min-Kyung, P., Sung-Kyu, K., & Young-Hee, C. (2014). Antioxidant capacity and anti-inflammatory activity of lycopene in watermelon. *International Journal of Food Science & Technology*, 49(9). doi:10.1111/ijfs.12517
- Córdova, F., Reyes Toriz, E. D., & Suárez Herrera, M. A. (2006). Remoción de metales pesados con carbón activado como soporte de biomasa. *Universidad Autónoma de Nuevo León*, 9(31).
- de Conto, L. C., Lefevre Gragnani, M. A., Maus, D., Ifanger Ambiel, H. C., Chih Chiu, M., Grimaldi, R., & Guaraldo Gonçalves, L. A. (2011). Characterization of Crude Watermelon Seed Oil by Two Different Extractions Methods. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 88, 1709-1714. doi:10.1007/s11746-011-1850-8
- Dirección General de Tecnología Agraria. (2002). Aproximaciones al cultivo de sandía triploide en Aragón. *Informaciones Técnicas*(114). Obtenido de https://bibliotecavirtual.aragon.es/es/catalogo_imagenes/grupo.do?path=3705275
- Ecoterra. (2025). Obtenido de Ecoterra.
- El-Adawy, T., & Taka, K. (2001). Characteristics and composition of watermelon, pumpkin, and paprika seed oils and flours. *J Agric Food Chem*, 49(3). doi:10.1021/jf001117+
- FAO. (2023). *Statistical Yearbook 2023: World Food and Agriculture*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Obtenido de <https://www.fao.org/statistics/yearbook/2023>
- Feizy, J., Jahani, M., & Ahmadi, S. (2020). Antioxidant activity and mineral content of watermelon peel. *Journal of Food and Bioprocess Engineering*, 3(1), 35-40.

Fila, W. A., Ifam, E., Jonhson, J., Oko, O. M., Effiong, E., Dasofunko, K., & Ambo, E. (2013). Comparative proximate compositions of watermelon *Citrullus lanatus*, squash *Cucurbita pepo* l and rambutan *Nephelium lappaceum*. *International Journal of Science and Technology*, 2(1), 81-88.

Gusmini, G., & Wehner, T. C. (2004). Cultivars Suitable for Watermelon Rind Pickles. *HortScience*, 39(4). doi:10.21273/HORTSCI.39.4.811A

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación* (Sexta ed.). México D.F.: McGraw-Hill.

Hu, S. y. (2005). *Food plants of China*. Hong Kong (China): The Chinese University of Hong Kong Press.

Ibáñez Moreno, W. J., Arcos Logroño, J. P., & Narvaez Brito, J. M. (2021). Técnicas espectroscópicas utilizadas para determinar la calidad del agua. *Polo del Conocimiento*, 6(9), 45-58. doi:10.23857/pc.v6i9.3004

Instituto Nacional de Calidad (INACAL). (23 de enero de 2023). *Gobierno del Perú*. Obtenido de INACAL brinda requisitos de calidad de la sandía: <https://www.gob.pe/institucion/inacal/noticias/895565-inacal-brinda-requisitos-de-calidad-de-la-sandia>

Kuskoski, E. M., Asuero, A. G., Troncoso, A. M., & Mancini-Filho, J. (2005). Aplicación de diversos métodos químicos para determinar actividad antioxidante en pulpa de frutos. *Food Science and Technology*, 25(4). doi:10.1590/S0101-20612005000400016

L.G. Wade, J. (2011). *Organic Chemistry* (Octava ed., Vol. II). PEARSON.

Lakshmipathy, R., & Sarada, N. (2015). Metal ion free watermelon (*Citrullus lanatus*) rind as adsorbent for the removal of lead and copper ions from aqueous solution. *Desalination and Water Treatment*, 57(33), 1-11. doi:10.1080/19443994.2015.1072064

Letchipia, J. O., González Trinidad, J., JÚnez Ferreira, H. H., Bautista Capetillo, C., Robles Rovelo, C. O., & Contreras Rodríguez, A. R. (2023). Removal of arsenic from semiarid area groundwater using a biosorbent from watermelon peel waste. *Heliyon*, 9(2). doi:10.1016/j.heliyon.2023.e13251

Logaraj, T., Bhattacharya, S., Sankar, K. U., & Venkateswaran, G. (2008). Rheological behaviour of emulsions of avocado and watermelon oils during storage. *Food Chemistry*, 106(3), 937-943. doi:10.1016/j.foodchem.2007.07.004

Luque de Castro, M., & García Ayuso, L. (2000). Soxhlet extraction. En R. A. Meyers, *Encyclopedia of Analytical Chemistry* (págs. 2701-2708). John Wiley & Sons. doi:10.1002/9780470027318.a5606

Mahla, H. R., Rathore, S. S., Venkatesan, K., & Sharma, R. (2018). Analysis of fatty acid methyl esters and oxidative stability of seed purpose watermelon (*Citrullus lanatus*) genotypes for edible oil. *Journal of Food Science and Technology*, 55(4), 1552-1561.

MINAGRI. (2022). *Ministerio de Agricultura y Riego*. Obtenido de <https://www.gob.pe/minagri>

Moneim, A., Elhadi Sulieman, A. M., & Ibrahim, S. E. (2022). Antioxidant and pharmacological activity of watermelon (*Citrullus lanatus*) seed oil. *Multiple*

Biological Activities of Unconventional Seed Oils. doi:10.1016/B978-0-12-824135-6.00027-1

Munteanu, I. G., & Apetrei, C. (2021). Analytical Methods Used in Determining Antioxidant Activity: A review. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(7). doi:<https://doi.org/10.3390/ijms22073380>

Neglo, D., Tettey, C. O., Essuman, E. K., Kortei, N. K., Boakye, A. A., Hunkpe, G., . . . Devi, W. S. (2021). Comparative antioxidant and antimicrobial activities of the peels, rind, pulp and seeds of watermelon (*Citrullus lanatus*) fruit. *Scientific African*, 11. doi:10.1016/j.sciaf.2020.e00582

Nurchi, V. M., & Villaescusa, I. (2008). Agricultural biomasses as sorbents of some trace metals. *Coordination Chemistry Reviews*, 252(10-11), 1178-1188. doi:10.1016/j.ccr.2007.09.023

Ouassor, I., Aqil, Y., Belmafhraoui, W., & El Hajjaji, S. (2020). Characterization of two Moroccan watermelon seeds oil varieties by three different extraction methods. 27(13), 8. doi:10.1051/ocl/2020010

Pérez Jiménez, J. (2019). Potencial de los polifenoles de la dieta (extraíbles y no extraíbles) en la prevención de enfermedades cardiometabólicas. *Anales Rahm*, 136(2). doi:10.32440/ar.2019.136.03.rev11

Perez Ruiz, A. O., Cartaya Padrón, L., Valencia Fernández, V., Sanjurjo Gámez, V., & Ilisástegui Ortueta, T. (1998). Biosíntesis de los productos del ácido araquidónico y su repercusión sobre la inflamación. *Revista Cubana de Estomatología*, 35(2), 56-61. Obtenido de <https://revestomatologia.sld.cu/index.php/est/article/view/2251>

Petchsomrit, A., McDermott, M. I., Chanroj, S., & Choksawangkarn, W. (2020). *Watermelon seeds and peels: fatty acid composition and cosmeceutical potential*. Tailandia: EDP Sciences. doi:10.1051/ocl/2020051

Poole, C. F. (2015). Ionization-based detectors for gas chromatography. *Journal of Chromatography A*, 1421, 137-153. doi:10.1016/j.chroma.2015.02.061

Prestes, A. A., Canella, M. H., Helm, C. V., Gomes da Cruz, A., & Prudencio, E. S. (2023). The use of cold pressing technique associated with emerging nonthermal technologies in the preservation of bioactive compounds in tropical fruit juices: an overview. *Current Opinion in Food Science*, 51. doi:10.1016/j.cofs.2023.101005

Quispe Minaya, R. (2024). Influencia del metodo de extracción de aceite de la semilla de sandía (*Citrullus lanatus* L.) sobre las características físico químicos y composición de ácidos grasos. *[Tesis de maestría]*. Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo.

Rappoport, Z. (2003). *The chemistry of phenols*. John Wiley & Sons. doi:10.1002/0470857277

S. Raziq, F. A. (2012). *Characterization of seed oils from different varieties of watermelon [Citrullus lanatus (Thunb.)] from Pakistan*. Pakistan. doi:10.3989/gya.022212

Sánchez Medina, I. A., & Huerta Greco, K. (2012). *Obtención y caracterización de biodiésel a partir de aceite de semillas de Ricinus communis (higuerilla) modificadas genéticamente y cultivadas en el Eje Cafetero*. Universidad Tecnológica de Pereira.

- Siew, Y. Q., Ngan, K. C., & Peter, S. (2007). The physicochemical properties of spray-dried watermelon powders. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 46(5), 386-392. doi:10.1016/j.cep.2006.06.020
- Skoog, D. A., Holler, F. J., & Crouch, S. R. (2007). *Principles of Instrumental Analysis* (Séptima ed.). Belmont, California: Thomson Brooks/Cole.
- Smith, B. C. (2011). *Fundamentals of Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (Segunda ed.). Taylor & Francis.
- Soonmin, H. (2022). Low-Cost Adsorbents for the Removal of Phenol/Phenolics, Pesticides, and Dyes from Wastewater Systems: A Review. *Water*, 14(20). doi:10.3390/w14203203
- Tissot, E., Rochat, S., Debonneville, C., & Chaintreau, A. (2012). Rapid GC-FID quantification technique without authentic samples using predicted response factors. *Flavour and Fragrance Journal*, 27(4), 290-296. doi:10.1002/ffj.3098
- Torres Romero, J. C., Ortega Torres, M. J., Rojas Pinzón, D. M., Infante-Betancour, J. A., & Leal Mejía, L. Y. (2017). Identificación de ácidos grasos y compuestos fenólicos de los aceites extraídos a partir de semillas de *Ulex europaeus*. *Revista De Investigación Agraria Y Ambiental*, 8(2), 71-77. doi:10.22490/21456453.2032
- Valenzuela B, A., & Morgado T, N. (2005). Las grasas y aceites en la nutrición humana: algo de historia. *Revista Chilena de nutrición*, 32(2), 88-94. doi:10.4067/S0717-75182005000200002
- Wanja, N. E., Murungi, P. J., Hassan, P. A., & Wanjau, P. R. (2016). Efficacy of Adsorption of Cu (II), Pb (II) and Cd (II) Ions onto Acid Activated Watermelon Peels Biomass

from Water. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 5(8), 671-679.
doi:10.21275/ART2016929

World Health Organization. (2017). *Guidelines for Drinking-water Quality* (Vol. Cuarta Edición).

Yurkanis, P. (2007). *Organic Chemistry* (Quinta ed.). Pearson Prentice Hall.

Zapata, B., Balmaseda, J., Fregoso-Israel, E., & Torres-García, E. (2009). Thermo-kinetics study of orange peel in air. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 98(1), 309-315. doi:10.1007/s10973-009-0146-9

Zohary, D., Weiss, E., & Hopf, M. (2012). *Domestication of Plants in the Old World - The Origin and Spread of Domesticated Plants in South-west Asia, Europe, and the Mediterranean Basin* (Cuarta ed.). Oxford University Press.
doi:10.1093/acprof:osobl/9780199549061.001.0001

Anexos

Anexo 1: Recolección y pretratamiento de los residuos de sandía	96
Anexo 2: Extracción de aceite de semilla de sandía	96
Anexo 3: Análisis de ácidos grasos, contenido fenólico total y capacidad antioxidante del aceite de semilla de sandía	97
Anexo 4: Bioadsorción de plomo empleando mesocarpio de sandía	97
Anexo 5: Informe del análisis cromatográfico del estándar de ácidos grasos FAME Mix (37C), Chem-Lab	98
Anexo 6: Informe de la curva de calibración de ácido gálico por UV-visible	99
Anexo 7: Informe de FT-IR del mesocarpio de sandía antes y después del proceso de adsorción con plomo	100
Anexo 8: Informe del plomo remanente en solución por absorción atómica después de la bioadsorción con mesocarpio de sandía	101
Anexo 9: Presentación y difusión del proyecto de tesis en la Feria de Proyecto de Pre-Investigación 2024-2 FIQT-UNI	102

Anexo 1: Recolección y pretratamiento de los residuos de sandía



Recolección y limpieza de materia prima

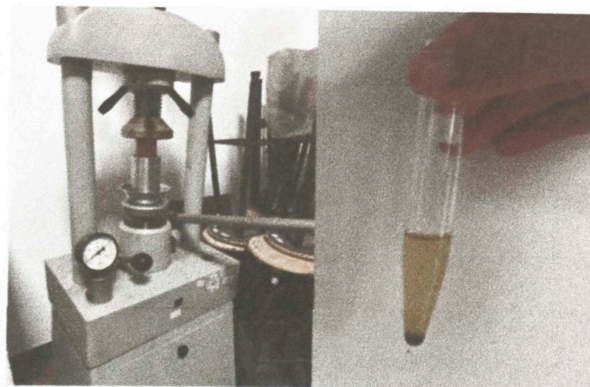


Secado de semilla y mesocarpio de sandía

Anexo 2: Extracción de aceite de semilla de sandía



Extracción Soxhlet



Extracción por prensado en frío

Anexo 3: Análisis de ácidos grasos, contenido fenólico total y capacidad antioxidante del aceite de semilla de sandía

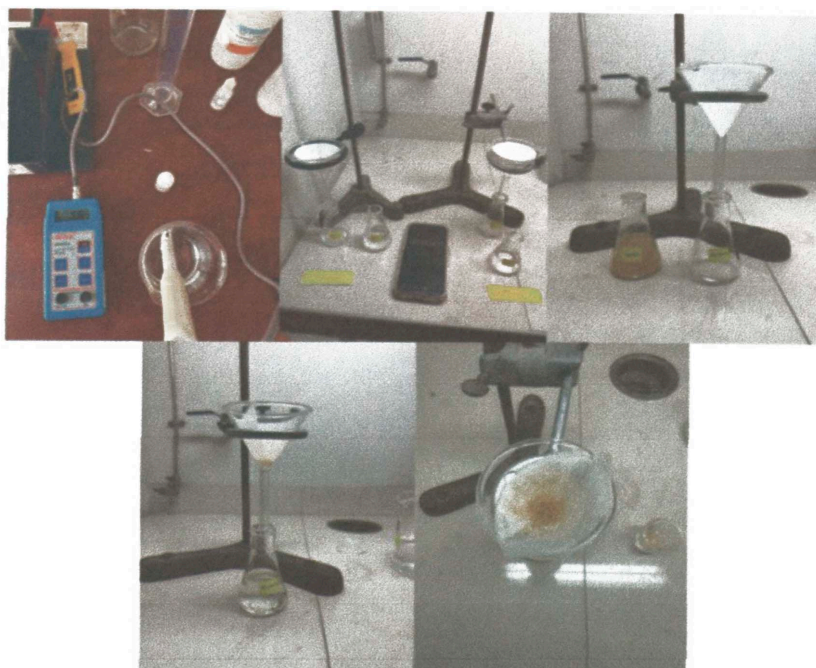


Transesterificación de los FAME del aceite y lectura por cromatografía GC-FID



Evaluación del contenido polifenólico total mediante el reactivo de Folin-Ciocalteu y evaluación de la actividad antioxidante mediante el ensayo DPPH analizadas por espectrofotometría UV-Visible

Anexo 4: Bioadsorción de plomo empleando mesocarpio de sandía



Evaluación de la capacidad de adsorción de iones $Pb(II)$ en solución acuosa mediante mesocarpio de sandía como bioadsorbente

Anexo 5: Informe del análisis cromatográfico del estándar de ácidos grasos FAME Mix (37C), Chem-Lab



SHIMADZU

LabSolutions

Analysis Report

<Sample Information>

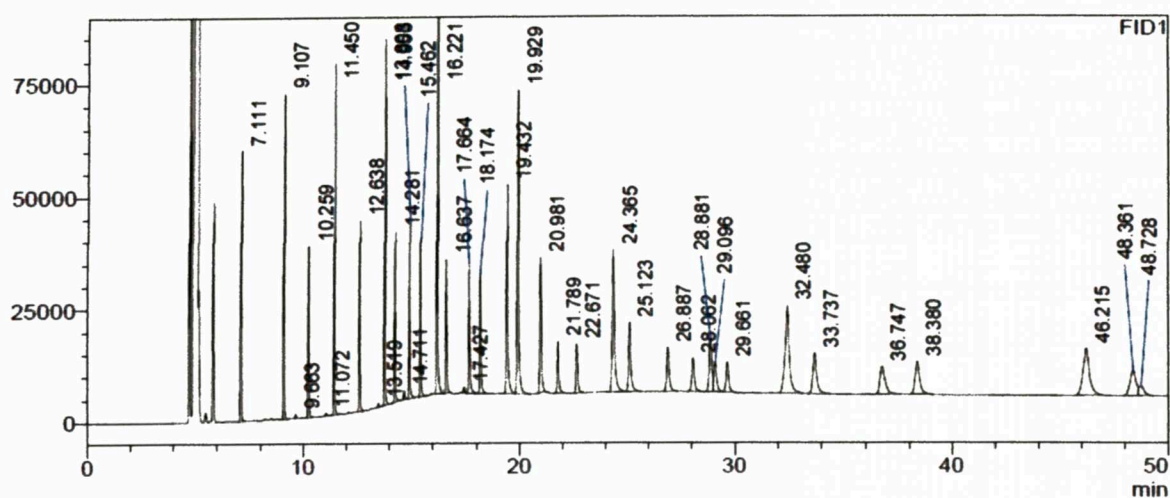
Sample Name : Fame STD
Sample ID : Fame std
Data Filename : cit06 fame std.gcd
Method Filename : EN03-FAMESstd.gcm
Batch Filename : Batch05-fame.gcb
Vial # : 1
Injection Volume : 2 uL
Date Acquired : 31/03/2025 04:40:48 p. m.
Date Processed : 02/04/2025 08:14:11 p. m.

Sample Type : Unknown

Acquired by : System Administrator
Processed by : System Administrator

<Chromatogram>

uV



Anexo 6: Informe de la curva de calibración de ácido gálico por UV-visible

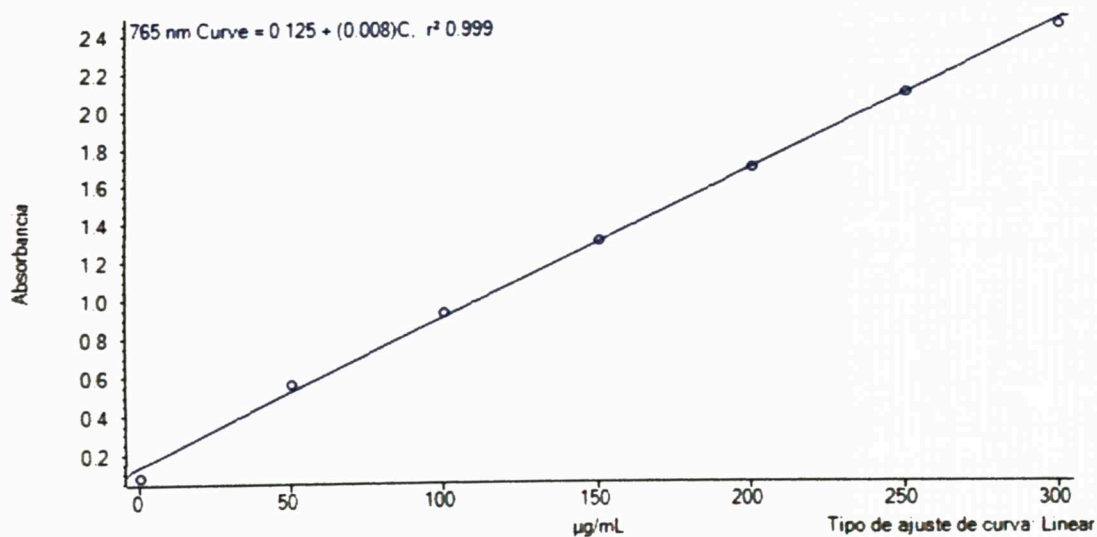
Thermo Scientific

Información de configuración

Elemento	Valor
Archivo de libro	C:\Users\user\Desktop\ENEIRA
Accesorios	Accesorio: Detector estándar
Software	INSIGHT: 2.5.92
microprograma, software inalterable	3.0.0.109
Nº serie	5A4Z182102
Nombre del método	
Tipo de método	Curva estándar
Tipo de ajuste de curva	Lineal
Longitud de onda del análisis	765 nm
Ecuación de Curva	$0.125 + (0.008)C$
r^2	0.999
Corrección de análisis	Ninguno
Longitud de recorrido	10 mm
Bandwidth	532 nm

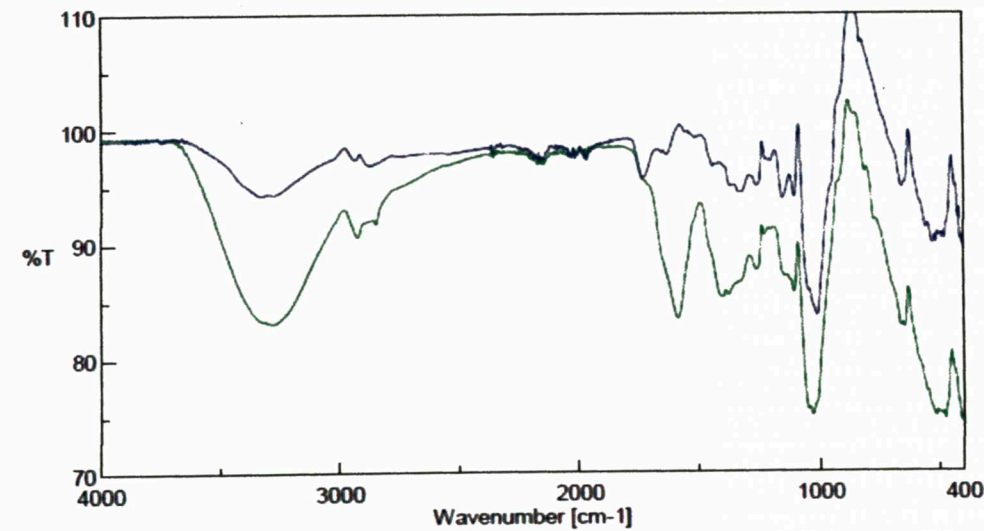
Thermo Scientific

Estándar	Fecha & Hora	Ac. Galico (µg/mL)	Usado	Abs 765
0 ppm	18/03/2025 13:06:13	0.000	Sí	0.073
50 ppm	18/03/2025 13:07:38	50.000	Sí	0.553
100 ppm	18/03/2025 13:09:27	100.000	Sí	0.930
150 ppm	18/03/2025 13:11:10	150.000	Sí	1.308
200 ppm	18/03/2025 13:13:16	200.000	Sí	1.692
250 ppm	18/03/2025 13:14:50	250.000	Sí	2.089
300 ppm	18/03/2025 13:16:11	300.000	Sí	2.446



Anexo 7: Informe de FT-IR del mesocarpio de sandía antes y después del proceso de adsorción con plomo

Result - Prueba08-jefrysp.jws



[Comparison of data]		Prueba08-jefrysp.jws Prueba09-jefrycp.jws	
Algorithm	Euclidean Distance		
Range	3999.640 - 400.157cm-1		
Sample	Prueba09-jefrycp		
Score	0.718		
[Comments]			
Sample name			
Comment			
Username			
Division			
Organization	UNI		
[Measurement Information]		[Detailed Information]	
Model name	FT/IR-4X1typeA	Creation date	23/04/2025 11:47
Serial No.	A035262111		
Accessory	ATR PRO 4X VIEW	Data array type	Linear data array
Accessory S/N	A005762127	Horizontal axis	Wavenumber [cm-1]
Incident angle	45 deg	Vertical axis	%T
Measurement date	23/04/2025 11:47	Start	399.193 cm-1
		End	4000.6 cm-1
		Data interval	0.964233 cm-1
		Data points	3736
Method	eneira2		
Light source	Standard		
Detector	TGS		
Accumulation	20		
Resolution	4 cm-1		
Zero filling	On		
Apodization	Cosine		
Gain	Auto (8)		
Aperture	Auto (7 mm)		
Scan speed	Auto (2 mm/sec)		
Filter	Auto (12800 Hz)		

Anexo 8: Informe del plomo remanente en solución por absorción atómica después de la bioadsorción con mesocarpio de sandía



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica

Laboratorio de Espectrometría

ANALISIS DE PLOMO EN 53 SOLUCIONES

SOLICITADO POR : ENRIQUE NEIRA MONTOYA

Recepción de muestras : Lima, 29 de Abril del 2025

RESULTADO DEL ANALISIS DE MUESTRAS

N°	Muestra	Pb(mg/L)	N°	Muestra	Pb(mg/L)
1	SAN01	50.10	27	SAN27	29.61
2	SAN02	38.83	28	SAN28	53.89
3	SAN03	41.65	29	SAN29	58.95
4	SAN04	37.46	30	SAN30	4.62
5	SAN05	36.10	31	SAN31	1.82
6	SAN06	39.53	32	SAN32	1.64
7	SAN07	38.83	33	SAN33	1.82
8	SAN08	49.10	34	SAN34	1.73
9	SAN09	38.97	35	SAN35	52.27
10	SAN10	34.77	36	SAN36	1.64
11	SAN11	39.53	37	SAN37	1.73
12	SAN12	38.97	38	SAN38	1.55
13	SAN13	35.83	39	SAN39	1.91
14	SAN14	38.14	40	SAN40	1.82
15	SAN15	17.89	41	SAN41	2.01
16	SAN16	17.67	42	SAN42	28.37
17	SAN17	16.80	43	SAN43	6.54
18	SAN18	16.26	44	SAN44	7.32
19	SAN19	15.72	45	SAN45	52.27
20	SAN20	16.26	46	SAN46	25.93
21	SAN21	58.60	47	SAN47	26.90
22	SAN22	33.58	48	SAN48	78.20
23	SAN23	33.19	49	SAN49	53.08
24	SAN24	30.87	50	SAN50	53.89
25	SAN25	30.24	51	SAN51	104.72
26	SAN26	29.74	52	SAN52	80.37
			53	SAN53	80.59

Lima, 8 de Mayo del 2025

[Firma]
MSc. Atilio Mendoza
Jefe Lab. ESPECTROMETRIA

Av. Túpac Amará N° 210, Lima 25, Apartado 1301-Perú
 Teléfono: (511) 4824427 , Central Telefónica (511) 4811070, Anexo 4245
 e-mail: labespectro@uni.edu.pe



Anexo 9: Presentación y difusión del proyecto de tesis en la Feria de Proyecto de Pre-Investigación 2024-2 FIQT-UNI



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA Y TEXTIL
Oficina de Responsabilidad Social Universitaria

CERTIFICADO

Jefry Weiser Farro Levano

Por haber participado en la categoría de Tesista de Pre grado, Post grado y egresados en la FERIA Y CONCURSO DE TRABAJOS DE PRE-INVESTIGACIÓN E INVESTIGACIÓN 2024-2 con el tema : “ **Separación y caracterización de aceites de semilla de naranja y sandía**”, realizado el 29 de noviembre del 2024.

Rímac, 31 de marzo 2025



Firmado digitalmente por:
COLLADO DOMÍNGUEZ Emerson
Alcides FAU 20169004359 hard
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 12/05/2025 17:10:17-0500

DR. ING. EMERSON A. COLLADO DOMÍNGUEZ

Decano de la Facultad de Ingeniería
Química y Textil



Firmado digitalmente por:
NORABUENA MEZA Edgar
Waldo FAU 20169004359 hard
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 12/05/2025 14:42:15-0500

DR. ING. EDGAR W. NORABUENA MEZA

Director de la Escuela Profesional
de Ingeniería Química



Firmado digitalmente por:
FRANCO PORTILLA VDA DE
ALVAREZ Luz Rosario FAU
20169004359 hard
Motivo: En señal de conformidad
Fecha: 10/04/2025 18:44:17-0500

DRA. ING. LUZ FRANCO PORTILLA

Directora de la Escuela Profesional de
Ingeniería Textil



Firmado digitalmente por:
ALVAREZ NUÑEZ EMMA
ANTONIA FIR 07157384 hard
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 08/04/2025 16:24:57-0500

MSC. ING. EMMA A. ALVAREZ NUÑEZ

Jefa de la Oficina de Responsabilidad
Social Universitaria