

CAPÍTULO I

MARCO TEORICO

1.1. Bioinsumo agrícola

1.1.1. Definiciones

Los bioinsumos agrícolas son productos de origen biológico, natural o mineral-orgánico que se utilizan en la producción agrícola con el fin de mejorar la nutrición vegetal, la fertilidad del suelo, la sanidad de los cultivos y la eficiencia del uso de los recursos, reduciendo la dependencia de insumos químicos de síntesis. (FAO, 2017)

Se consideran bioinsumos agrícolas, aquellos productos elaborados a partir de organismos vivos, extractos naturales o sustancias orgánicas, destinados a la nutrición vegetal, el mejoramiento del suelo o la protección fitosanitaria, y que cumplen con parámetros técnicos establecidos por la autoridad competente. (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, 2020)

1.1.2 Clasificación de bioinsumos agrícolas

De acuerdo a la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2020) la clasificación de los bioinsumos es de la siguiente manera:

•**Bioinsumos biológicos.** Son productos que contienen microorganismos vivos o esporas, como ser:

- Biofertilizantes microbianos (Rhizobium, Azotobacter, Azospirillum)
- Micorrizas
- Biocontroladores (Trichoderma, Bacillus, Beauveria)

•**Bioinsumos orgánicos o bioestimulantes.** Son productos no vivos, de origen orgánico natural, que estimulan procesos fisiológicos de las plantas, estos pueden ser:

- Ácidos orgánicos (fúlvicos y húmicos)
- Extractos de algas
- Aminoácidos
- Sustancias húmicas en general

•**Bioinsumos minerales-orgánicos.** Derivan de minerales con actividad

agronómica, que a su vez están combinados con materia orgánica, como ser:

- Leonardita
- Roca fosfórica activada
- Yeso agrícola
- Cal agrícola
- Silicatos naturales

•**Bioinsumos botánicos.** Son productos obtenidos por extracción en plantas, pueden ser:

- Extracto de neem
- Extracto de ají y ajo
- Aceites esenciales

•**Bioinsumos bioquímicos o fermentados.** Productos obtenidos por procesos de fermentación o hidrólisis.

- Aminoácidos libres
- Caldos minerales
- Biofermentados
- Extractos proteicos

1.1.3. La agroecología

La agroecología es un enfoque holístico e integrado que aplica simultáneamente conceptos y principios ecológicos y sociales al diseño y la gestión de sistemas agrícolas y alimentarios sostenibles. La agroecología es a la vez una ciencia, un conjunto de prácticas y un movimiento social, con el tiempo pasó de centrarse en los campos y granjas a abarcar la totalidad de los sistemas agrícolas y alimentarios. Representa un campo transdisciplinar, que incluye las dimensiones ecológica, sociocultural, tecnológica, económica y política de los sistemas alimentarios, desde la producción hasta el consumo. (FAO)

Es por eso que la obtención de ácidos húmicos y fúlvicos es una aplicación agroecológica, que se desarrolla en las fincas de Casa Real, esto debido a que estos

ácidos por sus características, permiten el uso más eficiente del agua de riego, permiten un mejor intercambio catiónico entre los nutrientes del suelo y las raíces de las plantas, en otras palabras, estimulan las tierras en donde se aplican, lo que indirectamente busca minimizar el introducir los nutrientes de forma artificial (agroquímicos) vía goteo, como se aplica normalmente. Este enfoque ya es agroecológico, porque busca minimizar el uso de los productos químicos convencionales y a su vez busca generar un impacto en los alrededores, ya que los productores aledaños son influenciados con el uso de estos nuevos insumos agrícolas e indirectamente son adoptados, generando un cambio no solo aplicativo, sino también, social que al final genera un campo más sostenible y sustentable cuidando el medio ambiente.

1.1.4. Biofactoría

Una biofactoría es un espacio destinado a la investigación y producción de insumos agroecológicos, es una planta de producción que puede contener distintos equipos, insumos, reactores y tanques de almacenamiento.

Entre los productos sintetizados en una biofactoría se pueden encontrar:

- Microorganismos activados
- Caldos minerales calientes y fríos
- Fertilizantes a base de materia prima orgánica como ser: Harinas de sangre, soya y plumas
- Quelatos de origen orgánico, como ser citratos.
- Bioestimulantes, como ser los ácidos húmicos y fúlvicos.

Una biofactoría es una herramienta de la agroecología, es decir, busca generar un impacto ambiental, social y económico, por lo que una biofactoría puede estar presente en cualquier finca o espacio que busque generar alternativas agroecológicas que compitan con los agroquímicos convencionales.

Fotografía I-1. Biofactoría en CASA REAL



Fuente: SAIV Ltda., 2026

1.2. Leonardita como materia prima

La leonardita es la materia prima utilizada para la obtención de ácidos húmicos y fúlvicos, es un carbón mineral proveniente del lignito y tiene ciertas características fisicoquímicas como por ejemplo: Alta oxidación que permite la existencia de muchos grupos funcionales, una alta capacidad de intercambio catiónico con el suelo, además de que tiene un pH ligeramente ácido y es insoluble en agua.

1.2.1. El carbón mineral

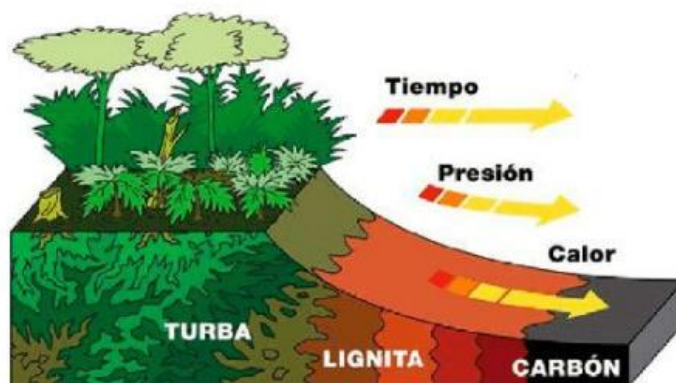
El carbón mineral es una roca sedimentaria que se forma a través de restos orgánicos fosilizados durante miles de años, existen variedades de carbón que se clasifican de acuerdo de su contenido de carbono; La turba que posee entre un 40-60% de carbono, el Lignito que contiene entre 60 y 75% de carbono, la hulla que contiene entre 75-90% de carbono y la antracita con un 95% de carbono. (Manuel D'Alessandro, RocasyMinerales, 2021)

1.2.2. El lignito

El lignito es una variedad del carbón mineral que se forma por compresión de la turba, se lo considera un combustible de calidad media, la composición química generalmente oscila entre el 69% de carbono, 5,2% de hidrógeno, 25% de oxígeno y 0,8% de nitrógeno. La mayor o menor presencia de carbono puede dar diferentes variedades de

lignito y estas variedades a su vez poseen diferentes aplicaciones, una de ellas como fuente de Leonardita. (Manuel D'Alessandro, RocasyMinerales, 2021)

Figura I-1. Composición de la tierra sometida a variables de descomposición



Fuente: Leonardita Iberia, 2025

1.2.3. La leonardita

La leonardita es un material orgánico natural altamente oxidado, derivado del lignito, caracterizado por un elevado contenido de sustancias húmicas, principalmente ácidos húmicos y ácidos fúlvicos, lo que lo convierte en una de las principales materias primas para la producción de bioinsumos agrícolas. (Stevenson F.J 1994, Humus Chemistry)

Fotografía I-2. Leonardita mineral o cruda



Fuente: Elaboración propia, 2026

1.2.3.1. Composición química de la leonardita

Las composiciones químicas de la leonardita varían de un depósito a otro, pero se tiene un comportamiento similar en función del contenido húmico presente. De acuerdo al Departamento de ciencias de las plantas y el suelo de la facultad de Agricultura de la universidad Chiang Mai de Tailandia, se tomaron 3 muestras de 3 lugares diferentes y se obtuvieron los siguientes resultados:

Figura I-2. Resultados de los análisis químicos a la leonardita

Leonardita Ejemplo	pH	Azufre total (%)	Orgánico materia (%)	Ácido húmico (%)
LD1-1	2.51	5.18	30.76	58.55
LD1-2	2.54	5.25	30.45	59.53
LD1-3	2.48	5.14	31.27	55.80
Promedio de	2.51±0.03	5.19±0.06	30.82±0.41	57.96±1.93
LD2-1	2.38	6.36	22.30	36.65
LD2-2	2.38	5.50	22.87	34.73
LD2-3	2.38	5.11	22.45	44.32
Promedio de	2.38±0	5.66±0.64	22.54±0.30	38.57±5.07
LD3-1	2.49	4.22	28.00	56.15
LD3-2	2.44	4.61	27.84	61.58
LD3-3	2.55	4.75	29.83	57.25
Promedio de	2.49±0.06	4.52±0.27	28.57±1.11	58.32±2.87

Leonardita Ejemplo	Total N (%)	Total P (mg kg ⁻¹)	Total K (%)	Ca (%)	Mg (%)	Fe (%)	Zn (mg kg ⁻¹)	Mn (mg kg ⁻¹)
LD1-1	0.48	149.6	1.33	1.88	0.57	3.25	75	110
LD1-2	0.55	167.2	1.39	2.00	0.55	3.11	77	109
LD1-3	0.60	149.6	1.39	2.22	0.54	3.22	54	102
Promedio	0.54±0.	15510±.	1.37±0.	2.03±0.	0.55±0.	3.19±0.	68.712±	1074±.3
LD2-2	0.51	167.2	1.16	3.05	0.43	5.24	56	86
LD2-3	0.49	162.8	1.18	3.36	0.42	5.10	67	85
Promedio	0.50±0.	15811±.	1.19±0.	3.15±0.	0.41±0.	5.22±0.	60.35±.	85.70±.
LD2	01	6	04	19	02	12	86	58
LD3-1	0.54	202.4	1.19	1.98	0.50	3.21	69	112
LD3-2	0.55	211.2	1.31	1.81	0.52	3.24	61	123
LD3-3	0.57	211.2	1.25	2.10	0.51	3.35	63	126
Promedio	0.55±0.	2085±.0	1.25±0.	1.96±0.	0.51±0.	3.27±0.	64.34±.	1027±.3
LD3	02	8	06	15	01	07	16	7

Fuente: Universidad Chiang Mai de Tailandia, 2022

Si estos resultados son promediados y tabulados, tenemos que la leonardita tiene la siguiente composición química:

Tabla I-1. Composición química de la leonardita

Propiedad	Valor	Unidad
Materia organica	27,31	%
Azufre total	5,12	%
Nitrogeno total	0,53	%
Fosforo total	173	mg/kg
Potasio total	1,27	%
Ca	2,38	%
Mg	0,49	%
Fe	3,89	%
Zn	64,47	mg/kg
Mn	98	mg/kg
Sustancias húmicas	51,61	%
pH	2,46	

Fuente: Universidad Chiang Mai de Tailandia, 2022

1.2.4. Otras fuentes de ácidos húmicos y fúlvicos

Las sustancias húmicas pueden obtenerse de distintos materiales orgánicos o residuos, entre los cuales tenemos: La leonardita, la turba, el compost, el carbón pardo y los residuos vegetales. (Stevenson F.J (1994), Humus Chemistry)

Tabla comparativa de contenido de sustancias húmicas:

Tabla I-2. Contenido de sustancias húmicas en otras fuentes

Fuente	Porcentaje (%)
Leonardita	60 – 90
Turba	30 – 60
Compost	10 – 30
Carbón Pardo	20 - 50

Fuente: Stevenson FJ, 1994

1.3. Sustancias húmicas

Canellas et. al (2008) define a las sustancias húmicas como asociaciones supramoleculares relativamente pequeñas, agrupadas básicamente por interacciones hidrofóbicas y puentes de hidrogeno.

Schulten y Schnitzer (2000) indican que el oxígeno está presente en forma de carboxilos, hidroxilos fenólicos y alcohólicos, ésteres y cetonas, mientras que el nitrógeno se produce en nitrilos y en estructuras heterocíclicas. Esta formación permite mostrar una microporosidad alta con huecos de varias dimensiones, que pueden atrapar y se unen a otros elementos del suelo, orgánicos o inorgánicos, asimismo el agua.

1.3.1. El humus

El humus es la fracción orgánica del suelo resultante de la descomposición y transformación bioquímica de residuos vegetales y animales, caracterizada por su elevada estabilidad, complejidad molecular y resistencia a la degradación biológica. (Genesis, Composition, Reactions, Wiley 1994)

Las sustancias húmicas provienen del humus y se componen de ácidos húmicos, ácidos fúlvicos y huminas residuales, definidas como macromoléculas orgánicas, con una estructura química compleja, distinta y estable que proviene de la degradación de plantas y animales, por la actividad enzimática de microorganismos y metamorfismo orgánico. (Schnitzer, 2000 y Sutton Sposito, 2005).

1.3.2. Ácidos húmicos y fúlvicos

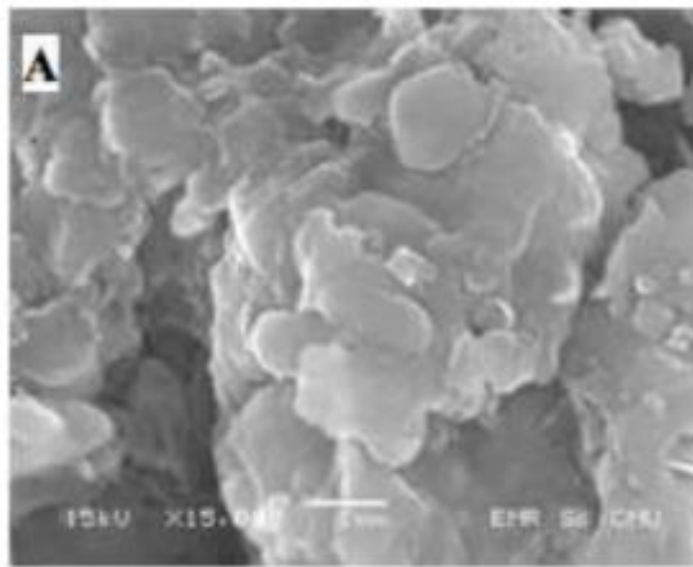
Los ácidos húmicos y fúlvicos son un grupo de moléculas heterogéneas presentes en los suelos, siendo la parte activa de la materia orgánica, estos se forman por la descomposición y oxidación de la materia orgánica. (Artal, SmartAgriculture, 2020)

Químicamente podemos definirlos como ácidos débiles, electrolitos con grupos carboxílicos, fenólicos, -OH y otros grupos activos.

Los ácidos fúlvicos y húmicos tienen un aspecto negro-marrón, con una estructura tipo micelial y con un peso molecular entre 500Da (ácidos fúlvicos) y 100.000Da (ácidos

húmicos). (Artal, SmartAgriculture, 2020)

Fotografía I-3. Molécula de ácidos húmicos



Fuente: Universidad Chiang Mai de Tailandia, 2022

1.3.2.1. Ácidos húmicos

De acuerdo a Arvensis (2024), los ácidos húmicos son moléculas grandes, complejas y de alto peso molecular, estas moléculas principalmente son hidrofóbicas (cadenas polimetilénica, ácidos grasos, compuestos esteroideos) que se estabilizan a un pH neutro por fuerzas hidrofóbicas de dispersión. Sus conformaciones crecen progresivamente cuando sus vínculos intermoleculares de hidrogeno son cada vez más formados en valores de pH más bajos, llegando a flocular. Estos ácidos son generalmente solubles en un medio alcalino (pH=13) pero insolubles en medio ácido, tienen un color marrón oscuro debido a su estructura molecular.

Un estudio realizado por Ciencias Agrícolas, UANL (2014) donde se midió la acidez total para caracterizar los grupos funcionales en cada ácido (fúlvico y húmico) indica que los ácidos húmicos están menos oxidados, que a su vez significa que están menos funcionalizados que los ácidos fúlvicos, esto indicaría menos cargas negativas.

Tabla I-3. Ácidos y grupos funcionales del ácido húmico

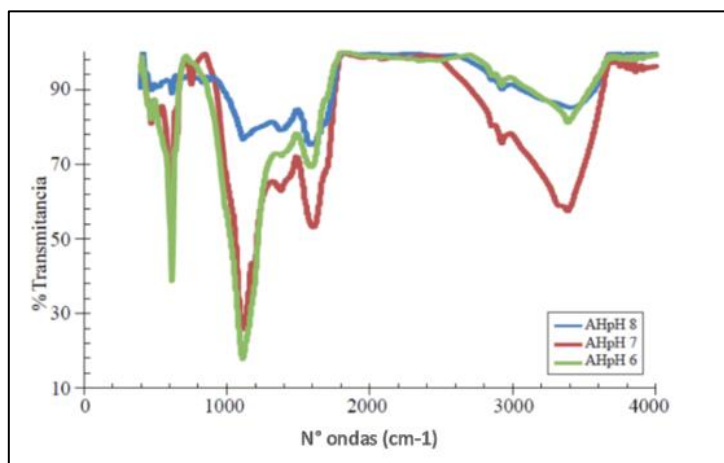
Tipo de sustancia húmica	AT (cmolc.kg ⁻¹)	-COOH (cmolc.kg ⁻¹)	-OH (cmolc.kg ⁻¹)
ACIDO HUMICO	200	10	190

Fuente: UANL, 2014

Así mismo la UANL (2014) realizó un estudio de la incorporación de un mineral que en este caso sería el Calcio, variando el pH de la solución y caracterizándolo con un espectrograma mediante análisis IR.

Espectrograma del ácido húmico enriquecido con Calcio:

Figura I-3. Espectrograma del ácido húmico



Fuente: UANL, 2014

Los resultados indican que de las mediciones en solución a pH 6-7-8, en pH 7 la adsorción de Calcio fue mucho mayor, debido a la mayor proporción de intercambio catiónico con los oxhidrilos y, por ende, la mejor opción si se quiere enriquecer el ácido húmico con algún mineral.

Asimismo, se indica que el pH original de los ácidos húmicos es de pH=8.

1.3.2.2. Ácidos fúlvicos

De acuerdo a Arvensis (2024), los ácidos fúlvicos son pequeñas moléculas hidrofílicas en los que hay grupos funcionales ácido suficientes para mantener los grupos fúlvicos dispersos a cualquier pH, es por eso que son solubles en agua, por lo que son más móviles y más disponibles para las plantas, tienen un color más amarillento a marrón claro.

El estudio realizado por las Ciencias Agrícolas de la UANL en 2014 indica que los ácidos fúlvicos son más oxidados y por ende tienen más grupos funcionales, lo que permite un mejor intercambio catiónico.

Tabla I-4. Ácidos y grupos funcionales del ácido fúlvico

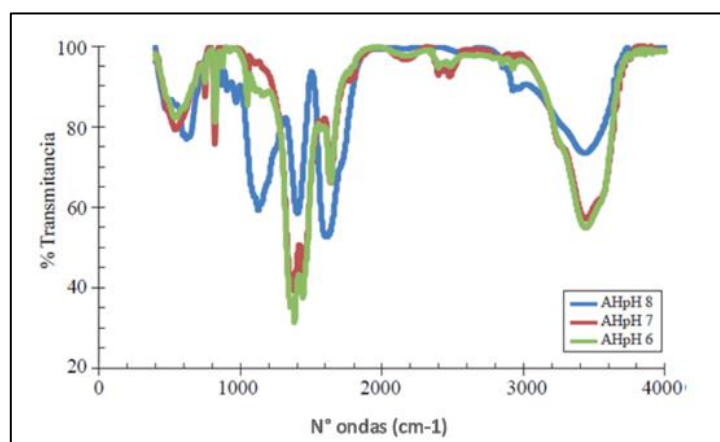
Tipo de substancia húmica	AT (cmolc.kg⁻¹)	-COOH (cmolc.kg⁻¹)	-OH (cmolc.kg⁻¹)
ACIDO FULVICO	1275	560	715

Fuente: UANL, 2014

Asimismo, se realizó un estudio de la incorporación de un mineral a diferentes condiciones de pH:

Espectrograma del ácido fúlvico enriquecido con Hierro:

Figura I-4. Espectrograma del ácido fúlvico



Fuente: UANL, 2014

Los resultados indican que a un pH de 6 y 7 los resultados son muy similares pero que a pH 7 la frecuencia del grupo funcional libre -OH es mayor, por lo que la cantidad de adsorción de hierro es mayor y por ende la mejor opción si se quiere enriquecer con algún mineral.

La UANL también menciona que el pH original de los ácidos fúlvicos es de 4.

1.3.3. Principales diferencias entre ácidos húmicos y fúlvicos

De acuerdo a la bibliografía antes consultada, las principales diferencias son:

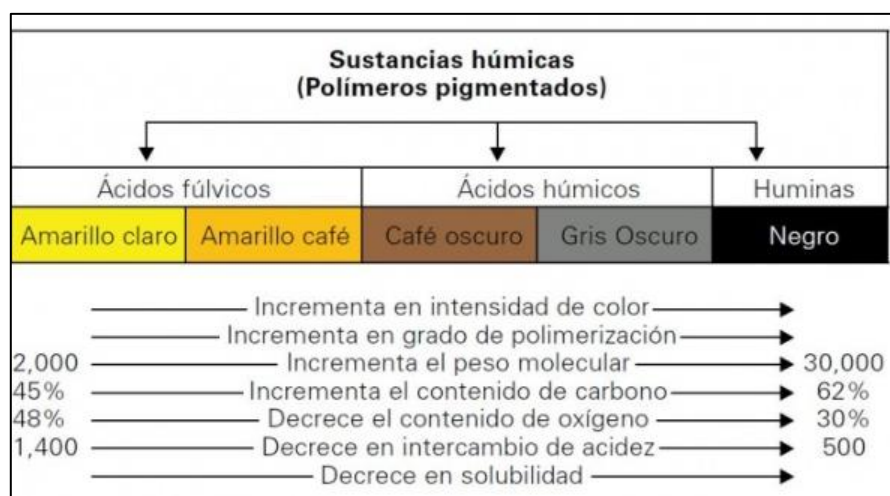
Tabla I-5. Diferencias entre ácidos fúlvicos y húmicos

Característica	Ácidos húmicos	Ácidos fúlvicos
Solubilidad	Medio alcalino	Medio alcalino/ácido
Criterio de separación	Precipitan al acidificar	Permanecen en solución
Peso molecular promedio	Mayor	Menor
Grado de oxidación	Menor	Mayor
Contenido de grupos funcionales	Menor	Mayor
Color característico	Marrón oscuro - negro	Amarillo - marrón claro
Capacidad de intercambio catiónico	Alto	Bajo
Movilidad en el suelo	Baja	Alta
Absorción por la planta	Limitada	Alta
Función en agricultura	Mejora estructura y fertilidad del suelo	Transporte de nutrientes y bioestimulante

Fuente: Elaboración propia, 2026

La colorimetría de los ácidos fúlvicos y húmicos es la siguiente:

Figura I-5. Colorimetría de las sustancias húmicas



Fuente: Stevenson, 1982

Es importante mencionar que las propiedades de las sustancias húmicas varían según su origen (Fukushima et al. 2006)

1.3.4. Beneficios de los ácidos húmicos y fúlvicos

El estudio realizado por la UANL en 2014 indica que los ácidos fúlvicos y húmicos extraídos de la leonardita muestran una alta capacidad de adsorción, debido a los grupos carboxilos, oxhidrilos, fenoles, aminas, amidas y metilos, siendo los oxhidrilos que muestran mayor proporción de intercambio con minerales.

Estos grupos funcionales tienen la particularidad de agrupar y quelatar cationes en la solución del suelo, llevarlos a la pared celular de la raíz, similar a agentes quelatantes y ser transportados por el torrente xilemático hacia los puntos de crecimiento. (Peuravoti et al. 2006)

Los complejos orgánicos-minerales permiten a las plantas superar los efectos adversos de la salinidad del suelo, mejora de la agregación, aireación, permeabilidad, capacidad de retención de agua, absorción de micronutrientes, disponibilidad y la disminución de absorción de algunos elementos tóxicos. (Ryabova, 2010)

1.3.5. Mecanismo de acción

Los ácidos fúlvicos y húmicos actúan mediante:

- Interacción con membranas celulares
- Activación enzimática
- Regulación del transporte iónico
- Formación de complejos órgano-minerales

1.4 Ácidos húmicos y fúlvicos como bioinsumos

Los ácidos fúlvicos y húmicos son sustancias orgánicas naturales derivadas del humus proveniente de la Leonardita, de acuerdo a la FAO, estos ácidos se clasifican como BIOESTIMULANTES, por lo que son aceptados como un bioinsumo agrícola.

1.4.1. Parámetros referenciales de los ácidos húmicos y fúlvicos como bioinsumo agrícola

Los parámetros referenciales que se mostrarán a continuación no pertenecen a alguna normativa en específico, ya que no existe norma que indique parámetros mínimos, sino que son valores referenciales provenientes de diferente literatura científica, fichas técnicas comerciales y asociaciones relacionadas al producto (IHSS).

Estos parámetros referenciales garantizan su funcionalidad agronómica:

Tabla I-6. Parámetros referenciales como bioinsumos agrícola

SUSTANCIAS HÚMICAS	
PARÁMETRO	VALOR
Sustancias húmicas totales	15 – 25%
Ácidos húmicos	12 – 20%
Ácidos fúlvicos	3 – 10%
Relación AF/AH	1:4
pH solución acuosa	6 – 10
Carbono orgánico total	25 - 40

Fuente: IHSS, Stevenson FJ 1994, Du Jardín 2015, fichas técnicas comerciales

Es importante mencionar que estos parámetros son referenciales, no todos los productos comerciales catalogados como bioinsumos agrícolas contienen las mismas concentraciones de AH y AF, asimismo la funcionalidad agronómica viene indicada por el fabricante y la dosificación de su producto.

Algunos ejemplos de productos comerciales son:

Figura I-6. Ficha técnica Biocat – 15

**Composición**

Extracto húmico total	15 % p/p
Ácidos húmicos	7 % p/p
Ácidos fúlvicos	8 % p/p
Óxido de potasio (K_2O) soluble en agua	4,5 % p/p

* Contiene ácidos húmicos de bajo peso molecular y alta reactividad.

Fuente: Atlántica Agrícola

Figura I-7. Ficha técnica HUMITECH

FICHA TECNICA HUMITECH	
DATOS DE LA EMPRESA	
Empresa Comercializadora	: FARMAGRO S.A.
Proveedor	: VELSAM MATERIAS BIOACTIVAS
IDENTIDAD	
Composición:	Extractos Húmicos Totales 16.00 % p/p
	Ácidos Húmicos 10.00 % p/p
	Ácidos Fúlvicos 6.00 % p/p
	Potasio 4.00 % p/p
Formulación	: Concentración soluble
Clase de Uso	: Acondicionadores de suelo

Fuente: FARMAGRO S.A

1.5 Procesos de obtención de ácidos húmicos y fúlvicos

La metodología planteada está en función a fuentes bibliográficas de obtención de ácidos fúlvicos y húmicos, no solo a partir de leonardita, sino también a partir de otras

fuentes, una vez planteados los métodos, mediante una matriz de Likert se elegirá la mejor alternativa, evaluando los mismos parámetros que tengan ambos procesos.

A continuación, se presentan dos métodos de obtención de ácidos húmicos y fúlvicos a partir de leonardita, si bien la metodología es parecida, el álcali y las condiciones operativas de extracción son diferentes.

1.5.1. Método con KOH como álcali

De acuerdo a la Universidad Autónoma de Nuevo León, mediante su departamento de Ciencias Agrícolas en su nota de investigación "Metodología para obtener ácidos fúlvicos y húmicos y su caracterización mediante espectrofotometría infrarroja" en 2014, el proceso se realiza de la siguiente manera:

- Preparación de insumos
- Extracción alcalina de las sustancias húmicas
- Caracterización física preliminar de la muestra
- Acidificación y fraccionamiento de sustancias húmicas
- Identificación de la fracción de ácidos fúlvicos y húmicos

Preparación de la materia prima

La leonardita es molida y tamizada, a un tamaño de partícula de 1,0 mm de diámetro, con el objetivo de homogenizar la materia prima y aumentar el área de contacto sólido - líquido durante la extracción.

Posteriormente, se pesan 5 gramos de Leonardita y se colocan en un matraz Erlenmeyer de 250ml.

Extracción alcalina de las sustancias húmicas

Al matraz donde se encuentra la Leonardita se le añaden 100ml de una solución de Hidróxido de Potasio 1N, con un pH aproximado de 13,5.

Esta mezcla se somete a un calentamiento en baño maría a 60°C durante 2 horas, esto permitirá la solubilización de las sustancias húmicas presentes en la Leonardita.

Finalizado el tiempo de extracción, la solución debe enfriar hasta temperatura ambiente.

Caracterización física preliminar

Del extracto obtenido, se toman 25ml de la solución, y posteriormente deben ser pesados para determinar la densidad del extracto alcalino. Esta caracterización permitirá tener un parámetro físico preliminar para el posterior análisis y control del proceso.

Acidificación y fraccionamiento de sustancias húmicas

La solución alcalina es acidificada mediante la adición de ácido acético con un pH de 2,4, la adición se realiza hasta que la solución alcance un pH=4, empleando un potenciómetro previamente calibrado con soluciones buffer de 4, 7 y 10.

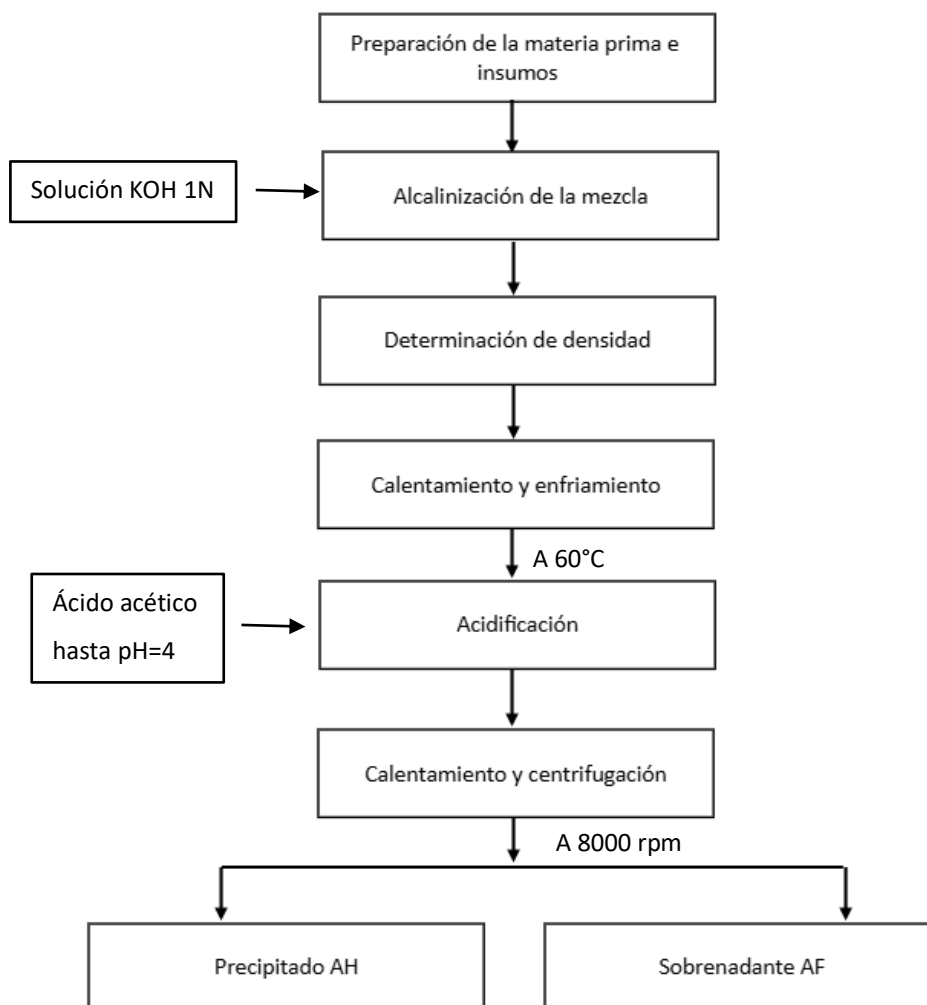
Posterior, la mezcla se calienta a 70°C y se somete a una centrifugación a 8000 rpm durante 30 minutos.

Identificación de la fracción de ácidos fúlvicos y húmicos

Bajo las condiciones previas, los ácidos húmicos precipitan, mientras que los ácidos fúlvicos permanecen en solución.

Los ácidos fúlvicos tienden a una coloración amarillo a amarillo-marrón en la solución remanente, los ácidos húmicos tienden a un color más oscuro y precipitan.

Figura I-8. Diagrama del proceso de obtención de sustancias húmicas con KOH



Fuente: Universidad Autónoma de Nuevo León de México, 2014

1.5.2. Obtención con NaOH

De acuerdo al Agrolaboratorio "CERES" en su nota de investigación "Metodología actualizada para determinación de ácidos fúlvicos y húmicos" por el Ingeniero Rigoberto Castañeda M. Sc., Guatemala, 2010., la obtención de ácidos fúlvicos y húmicos siguen el siguiente proceso:

- Preparación de la muestra
- Extracción de la muestra con agente complejante

- Separación sólido-liquido
- Acidificación y fraccionamiento
- Obtención de fracciones húmicas

Preparación de la muestra

Se pesan 10 gramos de la leonardita previamente molida y tamizada, posteriormente se la trasvasa a un matraz Erlenmeyer de 250ml.

Extracción alcalina con agente complejante

A la muestra se le añaden 100ml de una mezcla extractante compuesta por NaOH 0,1M y $\text{Na}_2\text{P}_2\text{O}_7$ 0,1M. Esta solución se deja en reposo durante 24 horas a temperatura ambiente, esto permitirá la solubilización de las sustancias húmicas.

Separación sólido-liquido

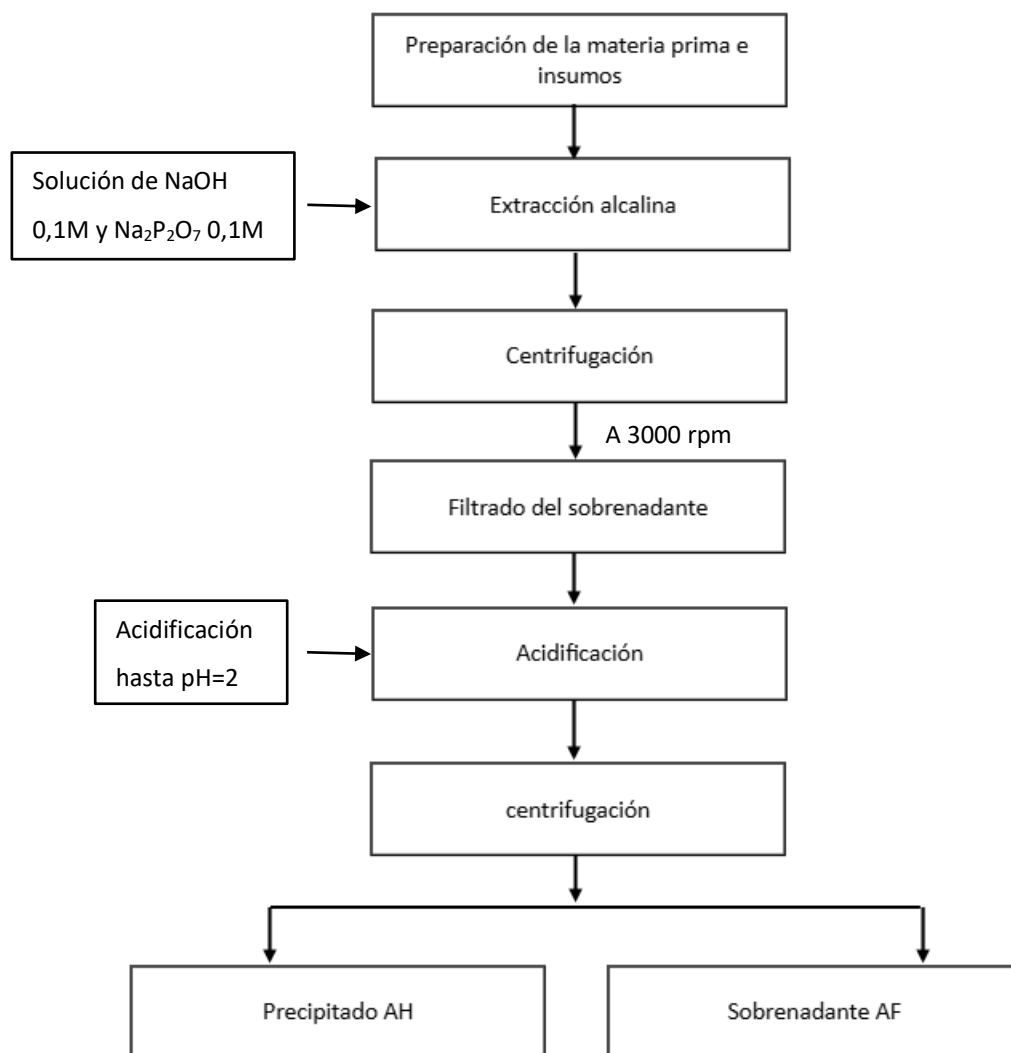
Transcurrido el tiempo de extracción la mezcla es centrifugada a 3000 rpm durante 20 minutos, esto permitirá la separación de la fase solida de la liquida. El sobrenadante es filtrado para eliminar partículas remanentes.

Acidificación y fraccionamiento

Del filtrado obtenido se toman 25ml, este filtrado se acidifica hasta un pH de 2 y posteriormente la solución se centrifuga a 3000 rpm por 20 minutos.

Esto permitirá la precipitación de los ácidos húmicos, los ácidos fúlvicos permanecerán en la solución sobrenadante, obteniendo los colores característicos.

Figura I-9. Diagrama del proceso de obtención de sustancias húmicas con NaOH



Fuente: Agro laboratorio “CERES” de Guatemala, 2010

CAPÍTULO II
PARTE EXPERIMENTAL

2.1. Descripción y análisis de la materia prima

La leonardita fue adquirida de PETRODRILL, empresa boliviana especializada en la importación, comercialización y distribución de productos químicos y fertilizantes para el sector agroindustrial.

Fotografía. II-1. Leonardita en su empaque junto a su registro fitosanitario



Fuente: SAIV Ltda., 2026

Los análisis físico – químicos de la materia prima se realizaron en los laboratorios de *Centro de Investigaciones Químicas S.R.L.*, ubicados en Quillacollo, Cochabamba.

En estos laboratorios se analizaron los siguientes parámetros (ANEXO 1):

- Análisis fisicoquímicos (pH, densidad, viscosidad, gravedad específica)
- % Humedad
- % Cenizas

- % Ácidos húmicos
- % Ácidos fúlvicos
- % Carbón orgánico total

2.1.1. Resultados de los análisis de la materia prima

Los resultados de los análisis de la Leonardita son los siguientes:

Tabla II-1. Análisis fisicoquímico de la Leonardita

Parámetro	Cantidad	Unidad
Humedad	4,06	%p/p
Cenizas	80,49	%p/p
*Ácidos húmicos	201,6	g/Kg
*Ácidos fúlvicos	106,9	g/Kg
Carbón orgánico total	7,14	%p/p

Fuente: Centro de Investigaciones Química S.R.L., 2026

* Es importante mencionar que los valores de sustancias húmicas presentes en el análisis son de carácter de calidad o riqueza, y no así de composición del producto.

De acuerdo a los análisis realizados, con el dato de **%Humedad** es posible realizar el diseño experimental para determinar el **%Rendimiento de extracción alcalina de Sustancias Húmicas (SH)**. Así mismo se tiene una base cuantitativa de la cantidad de SH presentes en la materia prima, con este dato es posible saber la eficiencia de nuestro proceso.

Por otro lado, con los datos Ácidos Húmicos (AH) y Ácidos Fúlvicos (AF), podemos determinar el índice de riqueza húmica que contiene la fracción obtenida por el método, en este caso específicamente es 308,5g/Kg.

2.2 Selección del proceso para la obtención de ácidos húmicos y fúlvicos

Para la selección del método se utilizará la matriz de elección de Likert, donde la

valoración es la siguiente:

Tabla II-2. Escala de valoración de Likert

Escala	Puntuación
Muy bueno	5
Bueno	4
Regular	3
Malo	2
Muy malo	1

Fuente: Elaboración propia, 2026

Y la parte de ambos procesos que se tomarán son:

Temperatura

La temperatura es diferente en ambos procesos, mientras en uno se somete a temperatura ambiente, en el otro proceso se somete a temperatura de 60°C.

Tiempo de extracción

El tiempo de extracción es distinto en ambos métodos, el método con NaOH requiere 24 horas de extracción, mientras que el método con KOH requiere solamente 2 horas.

Costo de reactivos

Se evaluará el precio relativo de los insumos que se utilizarán en ambos métodos, sobre todo en álcali y los acidificadores, también se evaluará el consumo por lote y el impacto que tendrá en el producto final como bioinsumos.

Compatibilidad como bioinsumo

Se evaluará su compatibilidad como bioinsumo, principalmente por el álcali usado, evaluando la salinidad que pueda provocar el sodio en el suelo y la aportación de macronutrientes, como ser el potasio.

2.2.1. Matriz de Likert para la selección del proceso

Tabla II-3. Matriz de Likert

N°	Actividades	Valoración de 0 a 1	Método con NaOH	Ponderación	Método con KOH	Ponderación
1	Temperatura	0,3	4	1,2	4	1,2
2	Tiempo de extracción	0,2	3	0,6	5	1
3	Costos	0,1	4	0,4	2	0,2
4	Compatibilidad como bioinsumo	0,4	2	0,8	5	2
TOTAL		1	3		4.4	

Fuente: Elaboración propia, 2026

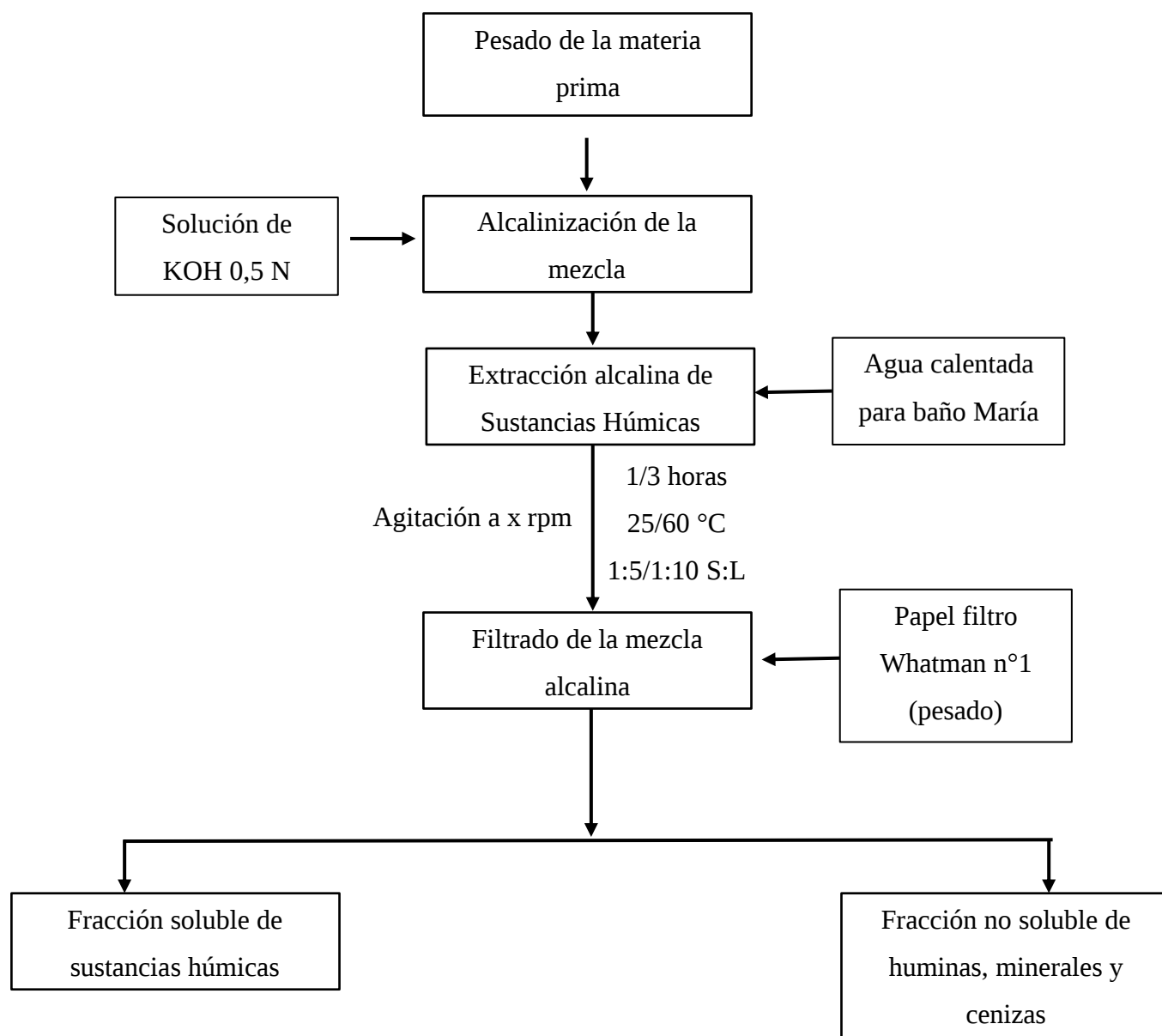
De acuerdo a la matriz de Likert, el mejor método ponderado es el método con KOH como álcali, que es un proceso con mejor tiempo, y sobre todo mejor compatibilidad como bioinsumo, además de tener el reactivo disponible.

2.2.2. Metodología para determinar el rendimiento de extracción

Es importante mencionar que, si bien el proceso seleccionado busca obtener los ácidos húmicos y fúlvicos, por cuestiones económicas los análisis de todos los tratamientos con sus réplicas no son posibles, es por eso que para determinar cuál fue la mejor combinación se optó por medir de forma indirecta la cantidad de sustancias húmicas extraídas, esto a través del %Rendimiento de extracción alcalina de sustancias húmicas, donde es importante mencionar que la metodología para la extracción sigue siendo la misma, solamente cambia la variable dependiente a medir.

El proceso consiste en obtener una diferencia de masas de la materia prima con peso en seco, en dos tiempos, uno antes de la extracción y otro al finalizar la extracción.

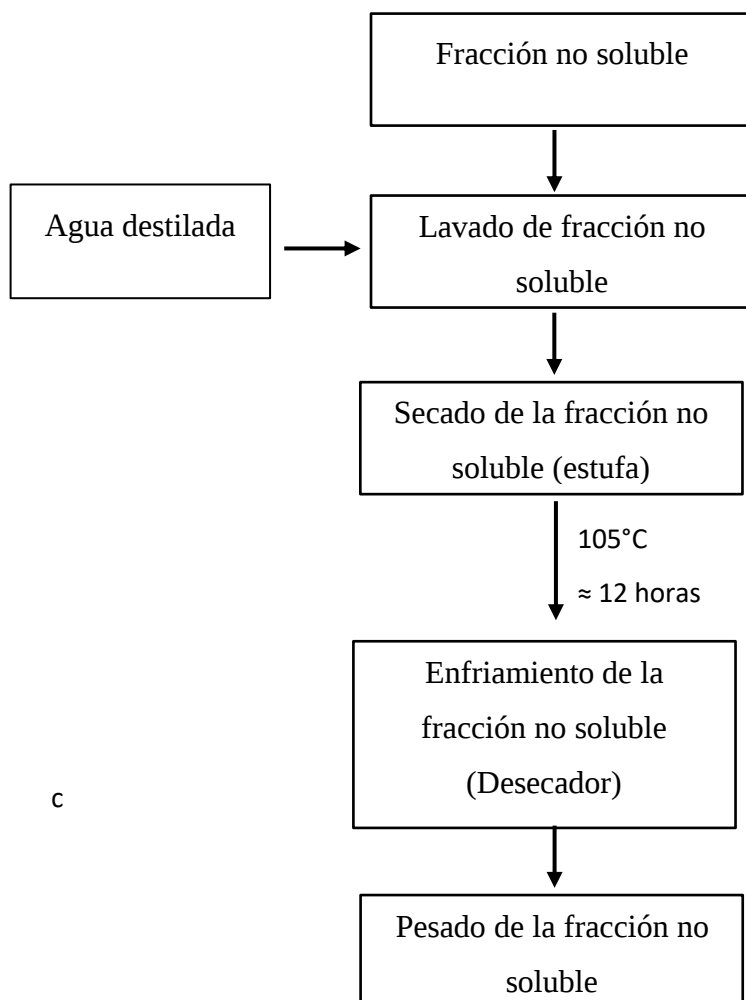
2.2.3. Diagrama de flujo del proceso

Figura II-1. Diagrama de flujo del proceso

Fuente: Elaboración propia, 2026

Para la fracción no soluble:

Figura II-2. Diagrama de flujo de la fracción no soluble

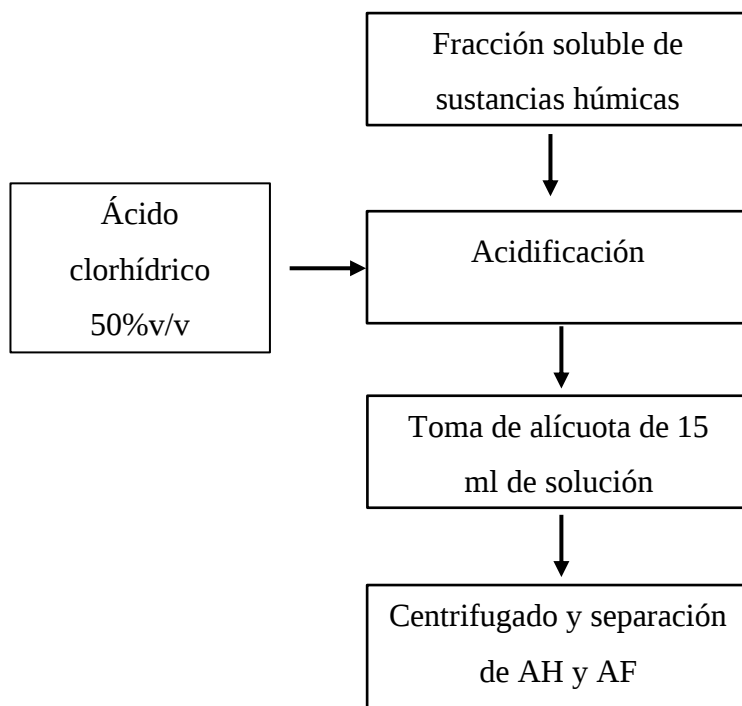


c

Fuente: Elaboración propia, 2026

Para la fracción soluble:

Figura II-3. Diagrama de flujo de la fracción soluble



Fuente: Elaboración propia, 2026

2.3. Diseño factorial

El diseño factorial es un método estadístico de experimentación que busca evaluar los efectos de todas las posibles combinaciones de los factores elegidos (variables independientes) sobre una respuesta, que en este caso es la variable dependiente.

2.3.1. Selección de variables del diseño factorial

De acuerdo a los métodos evaluados anteriormente, el aspecto más importante es la concentración adquirida de sustancias húmicas, pero que por su complejidad de análisis y el costo de estos, se optó por una alternativa indirecta para saber la eficiencia de extracción del proceso, por lo que de acuerdo a un análisis del sedimento que quede después de la extracción podremos saber cuánto se ha solubilizado, este dato será el

%Rendimiento de extracción alcalina de SH, mientras que por otro lado, para determinar este rendimiento se evaluarán las principales variables que pueden modificar el rendimiento de la extracción, que de acuerdo a bibliografía son la temperatura, el tiempo de extracción y la relación S/L.

Tabla II-4. Variables dependientes e independientes del experimento

N°	Variable	Tipo	Unidad
1	Temperatura	Independiente	°C
2	Tiempo de extracción	Independiente	Horas
3	Relación S/L	Independiente	g:ml
4	% Rendimiento de extracción alcalina de SH (principal)	Dependiente	%p/p
5	Ácidos húmicos (secundario)	Dependiente	g/Kg
6	Ácidos fúlvicos (secundario)	Dependiente	g/Kg

Fuente: Elaboración propia, 2026

La función objetivo del proyecto es el determinar el mejor **%rendimiento de extracción alcalina de SH** posible, en función de la variación de las variables independientes.

Así mismo como funciones objetivos secundarias del proyecto se tiene: La determinación mediante análisis de laboratorio el **% de ácidos húmicos y fúlvicos** presentes en los dos tratamientos con mejores rendimientos previamente analizados.

2.3.2 Diseño Factorial 2k

El modelo elegido para el sistema 2k es el diseño 2^3 , que tiene como modelo la siguiente ecuación de regresión:

$$\gamma = \beta_0 + \beta_A A + \beta_B B + \beta_C C + \beta_{AB} AB + \beta_{AC} AC + \beta_{BC} BC + \beta_{ACB} ABC + \varepsilon$$

Ec. II-1

Donde:

γ : Variable respuesta

β : Coeficientes de regresión

A, B, C: Variables codificadas

ε : Error

Es importante mencionar que de acuerdo a Bauer E.L en su libro Estadística para Químicos, se mencionan distintos tipos de Anovas, entre ellos el de modelo de Efectos fijos, que es el que se utiliza en este proyecto. En este modelo, los efectos principales se evalúan independientemente de los componentes de la interacción y en consecuencia para la formulación de modelo predictivo se consideran únicamente los efectos principales de los valores evaluados, esto debido a que una posible interacción puede provocar un enmascaramiento entre variables y afectar directamente al rendimiento, este argumento se justifica en el ANEXO 5 del presente documento, en donde no existe una significancia en los valores teóricos de rendimientos predichos con las ecuaciones del modelo con interacción y sin interacción, además de que se adoptará un modelo de Regresión multi lineal aditiva de efectos principales.

Entonces, se adoptará un modelo de regresión de primer orden, basado únicamente en estos efectos principales.

La ecuación de predicción queda de la siguiente manera:

$$\gamma = \beta_0 + \beta_A A + \beta_B B + \beta_C C$$

Ec. II-2

2.3.3. Codificación de variables

El diseño factorial para el sistema 2k es el 2³, donde tiene 3 factores; A, B y C, cada uno tiene dos niveles los cuales son un nivel alto con exponente 1 y otro nivel bajo con exponente 0.

Tabla II-5. Niveles del diseño factorial 2²

Variable	Nivel	
	Bajo	Alto
Temperatura (°C)	-	+
Tiempo de extracción (h)	-	+
Relación S:L (g:ml)	-	+

Fuente: Elaboración propia, 2026

Como se aplicará el diseño 2^k y serán 3 factores con 2 niveles, se tiene que el número de experimentos tomando 3 réplicas es de 24, de acuerdo a:

$$\text{Numero de experimentos} = 2^k \cdot n\text{Replicas} = 2^3 \cdot 3 = 24$$

Por lo que el diseño factorial tiene la siguiente forma:

Tabla II-6. Diseño factorial para el proceso de extracción

Nº	Replicas	Temperatura (°C)	Tiempo (h)	Relación S:L (g:ml)	% Rendimiento
1	I	-	-	-	R1
2		+	-	-	R2
3		-	+	-	R3
4		+	+	-	R4
5		-	-	+	R5
6		+	-	+	R6
7		-	+	+	R7

8		+	+	+	R8
---	--	---	---	---	----

9	II	-	-	-	R9
10		+	-	-	R10
11		-	+	-	R11
12		+	+	-	R12
13		-	-	+	R13
14		+	-	+	R14
15		-	+	+	R15
16		+	+	+	R16

17	III	-	-	-	R17
18		+	-	-	R18
19		-	+	-	R19
20		+	+	-	R20
21		-	-	+	R21
22		+	-	+	R22
23		-	+	+	R23
24		+	+	+	R24

Fuente: Elaboración propia, 2026

2.3.4. Niveles seleccionados para los factores designados

De acuerdo a la bibliografía consultada, artículos como “Procedimiento para la obtención de ácidos húmicos con alta capacidad de complejación de cationes”

publicado por Organización mundial de la propiedad intelectual en 2018, indican que la extracción se realiza a temperatura ambiente, donde el álcali usado es el KOH y se lo adiciona hasta que la solución tenga un pH entre 12 y 13.

El proyecto de grado “Análisis y caracterización de ácidos fúlvicos y su interacción con algunos metales pesados” presentado por Leticia Melo Lopez, en Instituto de Ciencias básicas e Ingeniería, indica que la extracción se realiza también a temperatura ambiente con una relación S:L de 1:10 donde la concentración del álcali (NaOH) fue de 0,1M, durante 2 horas.

La tesis “Extracción, caracterización de sustancias húmicas y su empleo en procesos fotoquímicos de interés ambiental” por Pedro M. David Gara en la Universidad Nacional de La Plata, indica que la extracción se realizó a temperatura ambiente con una relación S:L de 1:5 donde la solución alcalina de NaOH estaba ajustada a pH 9, durante 1 hora.

El proyecto de grado “Propuesta de planta piloto para para la extracción de ácidos húmicos y fúlvicos del compostaje de residuos orgánicos” por Milton Miño Castro en la Universidad Central del Ecuador, indica que la extracción se realizó a temperatura de 60°C durante 2 horas con una relación S:L de 1:10 a concentración 0,2N de la solución de KOH.

Finalmente, en la nota de investigación "Metodología para obtener ácidos fúlvicos y húmicos y su caracterización mediante espectrofotometría infrarroja” de la Universidad Autónoma de Nuevo León, indica que la extracción se realiza a 60°C durante 2 horas con una relación S:L de 1:20.

Adicionalmente para corroborar la bibliografía consultada se realizaron ensayos preliminares del factor S/L, donde se tomó como base una concentración de 0,5N de una solución de KOH.

A 10 gramos de leonardita se le añadieron 20 mililitros de la solución 0,5N de KOH, progresivamente se le fueron añadiendo 10 mililitros para observar el comportamiento del pH de la solución, obteniendo los siguientes valores:

Tabla II-7. Valores de pH para cada relación S/L con concentración 0,5N de KOH

Relación S/L	pH
1:2	6 – 7
1:3	10 – 11
1:4	11 – 12
1:5	12 – 13
1:6	13 – 14
1:7	14
1:8	14
1:9	14
1:10	14

Fuente: Elaboración propia, 2026

De acuerdo a los trabajos previamente mencionados y al marco teórico presente en este proyecto, algunos autores realizan la extracción a temperatura ambiente ($\approx 25^{\circ}\text{C}$) y otros a temperaturas $\approx 60^{\circ}\text{C}$, el tiempo varía de entre 1 hora a 3 horas, pero todos coinciden en que la extracción debe realizarse a un pH alcalino, de acuerdo a Arvensis en 2014, específicamente el pH debe ser de 13 – 13,5, por lo que el factor S/L llegaría a ser el más importante.

De acuerdo a la bibliografía consultada, a los ensayos preliminares, los niveles de los factores son los siguientes:

Tabla II-8. Niveles de los factores

Factor	Nivel bajo (-)	Nivel alto (+)
Temperatura (°C)	25 ± 2	60
Relación S:L (g:ml)	1:5	1:10
Tiempo de extracción (h)	1	3

Fuente: Elaboración propia, 2026

Entonces el diseño factorial con los niveles de cada factor queda de la siguiente manera:

Tabla II-9. Diseño factorial con los niveles

N°	Replicas	Temperatura (°C)	Tiempo (h)	Relación S:L (g:ml)	% Rendimiento
1	I	25 ± 2	1	1:5	R1
2		60	1	1:5	R2
3		25 ± 2	3	1:5	R3
4		60	3	1:5	R4
5		25 ± 2	1	1:10	R5
6		60	1	1:10	R6
7		25 ± 2	3	1:10	R7
8		60	3	1:10	R8

9	II	25 ± 2	1	1:5	R9
10		60	1	1:5	R10
11		25 ± 2	3	1:5	R11

12		60	3	1:5	R12
13		25 ± 2	1	1:10	R13
14		60	1	1:10	R14
15		25 ± 2	3	1:10	R15
16		60	3	1:10	R16

17	III	25 ± 2	1	1:5	R17
18		60	1	1:5	R18
19		25 ± 2	3	1:5	R19
20		60	3	1:5	R20
21		25 ± 2	1	1:10	R21
22		60	1	1:10	R22
23		25 ± 2	3	1:10	R23
24		60	3	1:10	R24

Fuente: Elaboración propia, 2026

A partir del diseño, se obtendrán los valores de rendimientos R para cada tratamiento, los cuales serán medidos para realizar los análisis correspondientes.

2.4. Descripción del método de investigación

El proceso de la investigación a realizar consiste en la obtención de Ácidos Húmicos y Ácidos fúlvicos expresados en “%RENDIMIENTO DE SUSTANCIAS HUMICAS TOTALES” que se extraen de la Leonardita gracias a un medio alcalino en condiciones controladas al cual se la somete.

De acuerdo a los métodos planteados tanto con KOH como con NaOH, y con la ayuda de la matriz de decisión de LIKERT, se optó por utilizar el método más conveniente,

que es el de extracción con KOH como álcali, en el cuál para medir la variable respuesta se utiliza el dato de la masa inicial de la materia prima libre de humedad y la masa final del residuo seco después de la extracción, que mediante una diferencia y comparación con la masa inicial se puede obtener el %Rendimiento de extracción alcalina de SH.

2.4.1. Materiales, insumos y equipos a utilizar

Tabla II-10. Materiales, equipos e insumos para la experimentación

Para la preparación de la solución KOH		
MATERIALES	EQUIPOS	INSUMOS
Vaso de precipitado de 500 ml	Balanza analítica	Hidróxido de potasio 62,33 gramos
Varilla de agitación		Agua destilada 2 litros
Probeta de 500 ml		
Matraz aforado de 0,5 L		
Espátula o cuchara		
Para la experimentación de los tratamientos		
Vaso de precipitado de 250 ml	Balanza analítica	Leonardita 300 gramos
Probeta de 100 ml	Agitador magnético con pastilla de 30x7mm	Solución 0,5N de KOH 2 litros
Espátula o cuchara	Estufa de secado	Agua destilada 1 litros
2 embudos	Termómetro	
30 unidades de papel filtro cualitativo Whatman N°1	Cronometro	
1 piseta	Fuente de calentamiento externa (jarra eléctrica)	

4 vidrios de reloj	Recipiente para baño maría (jarra de plástico)	
Pinzas	Desecador	
2 matraz Erlenmeyer de 250 ml		
Para la neutralización y fraccionamiento de los Ah y Af		
2 tubos falcon de 15 ml	pH-metro	Ácido clorhídrico 50% v/v 5 ml
Gradillas para tubos	Centrifuga	Solución filtrada de sustancias húmicas
Pipeta de 10 ml		Solución ácido cítrico al 40% m/v 100 ml
Pipeta de 2 ml		
Vaso de precipitado de 100 ml		

Fuente: Elaboración propia, 2026

2.4.2. Preparación de la solución KOH

La preparación de la solución de KOH estuvo en función a la cantidad de sólido que se utilizó en cada tratamiento, que, por la disponibilidad de los materiales, equipos e insumos, se decidió utilizar 10 gramos de sólido en cada relación S:L del diseño experimental.

2.4.2.1. Cálculos para la preparación de la solución de KOH

A) Volumen necesario para todos los tratamientos

El diseño experimental cuenta con 12 tratamientos con relación S:L de 1:5 y 12 tratamientos de relación S:L de 1:10.

Entonces para la relación 1:5 el volumen de la solución necesaria es:

$$V_{\text{KOH}} = n^{\circ} \text{ tratamientos} * \text{ml de relación}$$

Ec. II-3.

$$V_{\text{KOH}} = 12 * 50 \text{ ml}$$

$$V_{\text{KOH}} = 600 \text{ ml}$$

Y para la relación 1:10:

$$V_{\text{KOH}} = 12 * 100 \text{ ml}$$

$$V_{\text{KOH}} = 1200 \text{ ml}$$

Por lo que para ambas relaciones se tiene una suma total de 1800ml de solución necesaria y que, por razones operativas de laboratorio, perdidas u cualquier otro efecto, son necesarios **2000 mililitros** de la solución.

B) Masa requerida para el volumen calculado

Para calcular la masa requerida se partió de la concentración que necesita la solución, en este caso es 0,5 Normal, que con la fórmula de la normalidad:

$$N = \frac{m_s * \Theta}{PM * V} \quad \text{Ec. II-4.}$$

Donde:

N: normalidad (eq/l)

m_s : Masa del soluto (g)

Θ : Número de equivalentes (eq/mol)

PM: Peso molecular del soluto (g/mol)

V: Volumen de la solución (l)

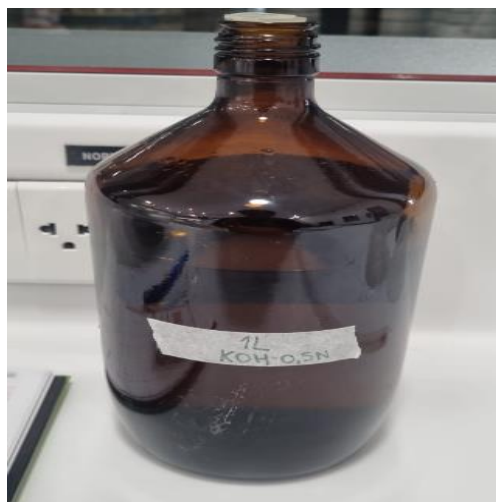
Despejando la masa del soluto y considerando pureza del 90% se tiene que:

$$m_s = \frac{N * PM * V}{\Theta} * \frac{1}{0,9} \quad \text{Ec. II-5.}$$

$$m_s = \frac{0,5 * 56,11 * 2}{1} * \frac{1}{0,9}$$

$$m_s = 62,34 \text{ gramos de KOH}$$

Fotografía II-2. Solución de hidróxido de potasio 0,5N envasada



Fuente: Elaboración propia 2026

2.4.3. Experimentación de los tratamientos

La experimentación de los tratamientos sigue la estructura detallada en el diagrama de flujo del proceso.

A continuación, se detalla el proceso para el tratamiento con condiciones:

Tabla II-11. Condiciones operativas del tratamiento ejemplo

Nº tratamiento	Temperatura	Tiempo de extracción	Relación S:L
8	60°C	3 horas	1:10

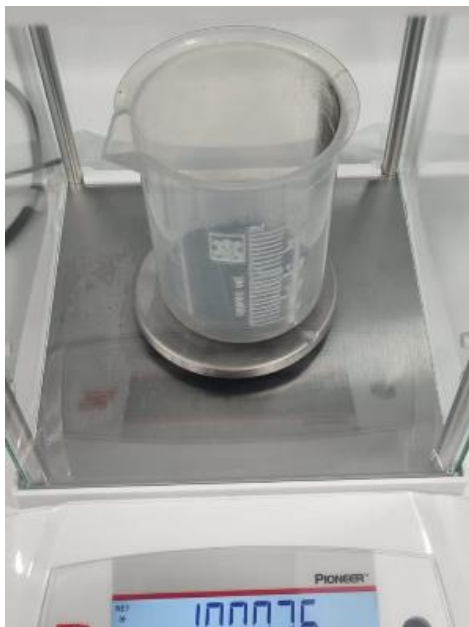
Fuente: Elaboración propia, 2026

2.4.3.1. Pesado de la materia prima

Al ser una relación S:L de 1:5 y 1:10, la cantidad de masa de la materia prima se mantiene constante para todos los tratamientos, que en este caso por cuestiones operativas y disponibilidad de la materia prima se eligió la cantidad de **10 gramos**.

Asimismo, el recipiente de pesado fue un vaso de precipitado de 250ml que es en donde directamente ocurrirá la extracción.

Fotografía II-3. Leonardita pesada



Fuente: Elaboración propia, 2026

La **masa inicial** pesada se la expresa como “ **m_o** ” y para calcular el rendimiento en pasos más adelante es necesaria que esté libre de humedad, es decir, tengamos una **masa seca** que con ayuda del dato de **%humedad** brindada en la caracterización de la materia prima se tiene:

$$m_s = m_o * \left(1 - \frac{H}{100}\right) \quad \text{Ec. II-6.}$$

Donde:

m_s : Masa seca inicial (g)

m_o : Masa húmeda inicial (g)

H: Porcentaje de humedad (%)

Para todos los tratamientos la masa seca fue de:

$$m_s = 10,0283 * \left(1 - \frac{4,06}{100}\right)$$

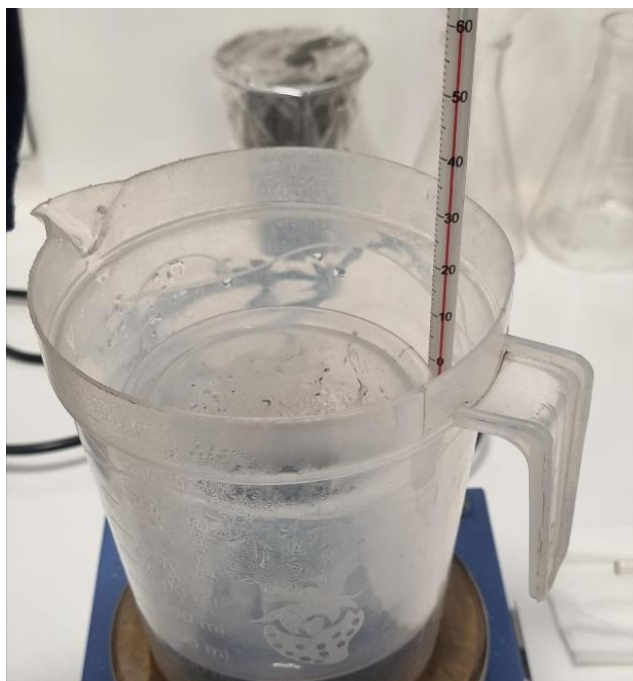
$$m_s = 9,6212 \text{ g}$$

2.4.3.2. Preparación del baño maría

El calentamiento del agua para el baño María se realizó en una jarra eléctrica y con la ayuda de un termómetro se fue midiendo la temperatura para acondicionar la justa adición de agua fría/caliente hasta llegar al punto requerido.

El recipiente utilizado para el baño maría es una jarra de plástico de 1 litro de capacidad.

Fotografía II-4. Sistema de baño maría a temperatura requerida



Fuente: Elaboración propia, 2026

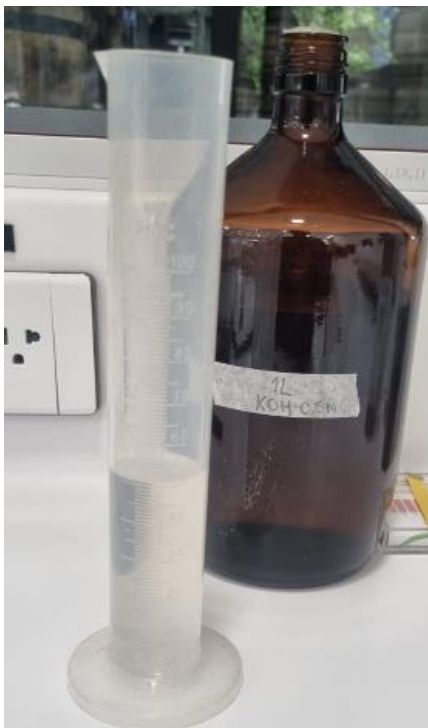
Asimismo, se fue añadiendo agua caliente y quitando agua fría cada vez que el baño maría lo requería para mantener la temperatura constante

La preparación del baño maría se realizó únicamente para los tratamientos que tengan la variable de temperatura de 60°C, como ser en este caso.

2.4.3.3. Adición del solvente alcalino a la muestra pesada

La adición del solvente alcalino se realizó con ayuda de una probeta de 100ml, donde de acuerdo a la cantidad necesaria que está en función de las relaciones sólido líquido establecidas, se añadieron 50ml y 100ml.

Fotografía II-5. Probeta cargada con solvente alcalino



Fuente: Elaboración propia, 2026

En este tratamiento ejemplo en particular la condición de relación fue de 1:10.

2.4.3.4. Extracción alcalina en condiciones operacionales de temperatura, agitación y tiempo

Ya teniendo listo el baño María a temperatura requerida y la muestra con la relación S:L establecida, se montó el sistema de control de temperatura y con ayuda de un agitador magnético a ≈ 900 revoluciones por minuto se iniciaron con la extracción de ácidos húmicos y fúlvicos.

Fotografía II-6. Sistema de extracción en condiciones operacionales



Fuente: Elaboración propia, 2026

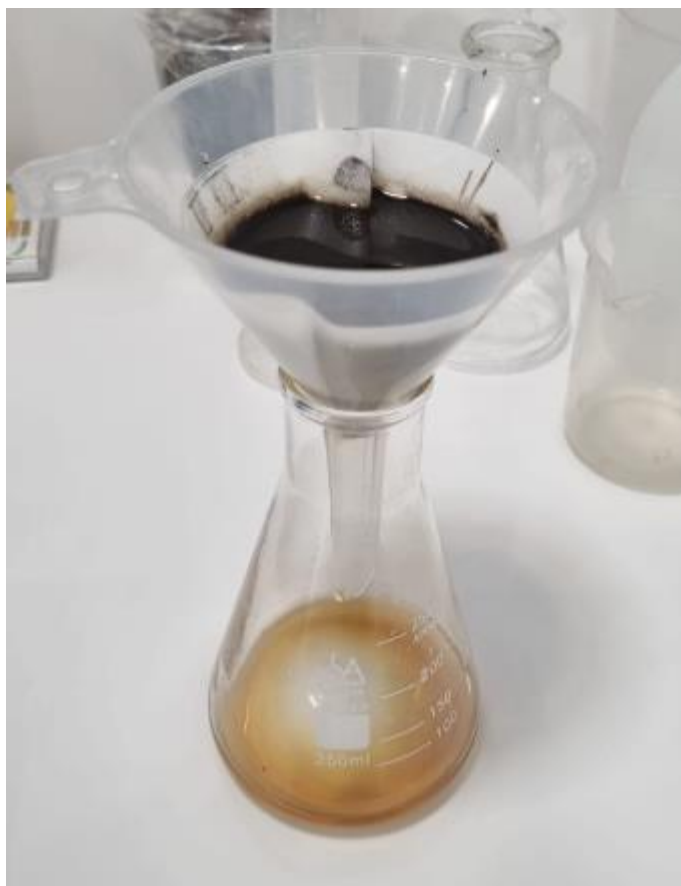
El tiempo de extracción estuvo en función a los valores establecidos, donde varió de 1 hora a 3 horas de extracción, este caso en particular fue de 3 horas.

2.4.3.5. Filtrado y lavado del residuo

Una vez completada la extracción en las condiciones operacionales establecidas, se pudo observar una solución en suspensión con partículas sólidas no solubilizadas que corresponderían a la parte no soluble de la materia prima y, por ende, la parte de sustancias húmicas no extraídas.

La masa de esta fracción no soluble es de interés para el cálculo del **%rendimiento de extracción alcalina de SH**, por lo que para medir su peso se procedió al filtrado de la fracción no soluble con ayuda del papel filtro Whatman N°1 previamente pesado, un embudo y un matraz Erlenmeyer de 250ml.

Fotografía II-7. Filtrado de la fracción no soluble



Fuente: Elaboración propia, 2026

Para asegurar que la fracción filtrada no contenga ningún trazo de hidróxido de potasio adherido, sustancias húmicas disueltas o sales solubles que puedan afectar a la medición de su masa, se procedió a lavar con agua destilada con ayuda de una piseta, esta acción se realizó hasta que el agua de lavado tuvo un pH neutro.

2.4.3.6. Secado en estufa

Tras obtener la fracción no soluble filtrada y lavada, se la trasladó junto al papel filtro a un crisol de porcelana previamente pesado y se lo llevó a secar a la estufa a 105°C, se la dejó en la estufa hasta tener un peso constante constatando la eliminación completa de la humedad y así poder obtener una masa final de residuo seco.

Fotografía II-8. Fracción no soluble en estufa



Fuente: Elaboración propia, 2026

Es importante mencionar que el papel filtro y el crisol antes de usarse fueron pesados para saber por diferencia la masa de la fracción no soluble.

2.4.3.7. Enfriado en desecador

Tras salir de la estufa, la muestra fue inmediatamente llevada a enfriar en un desecador, esto para evitar la posible absorción de humedad o cualquier contaminante que pueda afectar en la medición de la masa final.

Fotografía II-9. Muestra enfriando en desecador



Fuente: Elaboración propia, 2026

2.4.3.8. Pesado de la masa seca

Una vez que la muestra haya enfriado hasta temperatura ambiente en el desecador, se procedió a pesarla y mediante una diferencia poder determinar la **masa final** de la fracción no soluble de la siguiente manera:

$$m_r = m_T - m_p \quad \text{Ec. II-7.}$$

Donde:

m_r : Masa seca del residuo (g)

m_T : Masa total del papel y fracción no soluble (g)

m_p : Masa del papel filtro

Donde particularmente para este caso se tiene una masa del residuo de:

$$m_r = m_T - m_p$$

$$m_r = 10,4160 - 1,5182$$

$$m_r = 8,8978 \text{ g}$$

Fotografía II-10. Masa del residuo y el papel pesada en la balanza



Fuente: Elaboración propia, 2026

2.4.3.9. Rendimiento de la extracción alcalina de sustancias húmicas

Tras realizar la experimentación del tratamiento y controlando las variables operativas, se pudo obtener los dos datos primordiales para saber el **% de Rendimiento de extracción alcalina de sustancias húmicas**, estas son la **masa seca inicial** y la **masa seca final**

Con estos datos, la masa extraída de sustancias húmicas es:

$$m_{ext} = m_s - m_r \quad \text{Ec. II-8.}$$

Y para expresarlo en unidades de rendimiento sería:

$$R = \frac{m_s - m_r}{m_s} * 100\% \quad \text{Ec. II-9.}$$

Donde:

m_{ext} : Masa extraída (g)

R: Rendimiento de extracción alcalina de sustancias húmicas (%)

Puntualmente para este tratamiento ejemplo, la masa extraída es:

$$\begin{aligned} m_{ext} &= m_s - m_r \\ m_{ext} &= 9,6212 - 8,8978 \\ m_{ext} &= 0,7234 \text{ g} \end{aligned}$$

Y el rendimiento es:

$$\begin{aligned} R &= \frac{m_s - m_r}{m_s} * 100\% \\ R &= \frac{9,6212 - 8,8978}{9,6212} * 100\% \\ R &= 7,52 \% \end{aligned}$$

Este proceso se repitió de manera similar para los 24 tratamientos planteados en el diseño factorial y así obtener los valores de rendimiento, que es la función objetivo del proyecto.

2.4.4. Fraccionamiento de los ácidos húmicos y fúlvicos

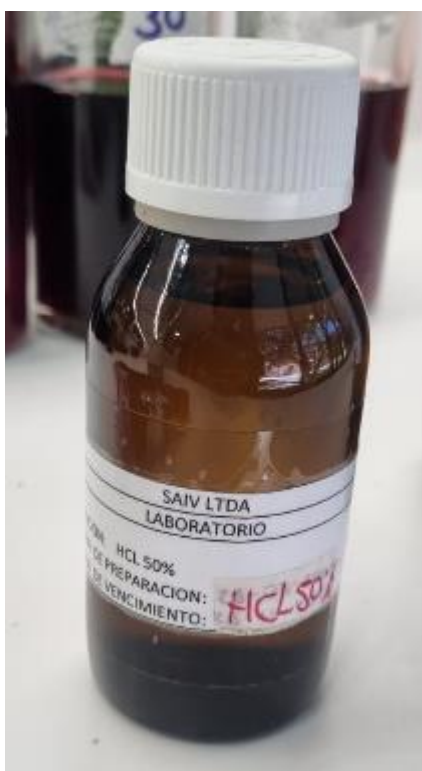
El fraccionamiento de los ácidos húmicos y fúlvicos corresponde únicamente a una parte cualitativa del proyecto, que sirve para identificar la presencia de estos ácidos y confirmar su correcta extracción.

El fraccionamiento ocurre gracias a la diferencia de solubilidad entre los ácidos húmicos y los fúlvicos en medio ácido, donde los ácidos húmicos tienden a precipitar formando un sedimento sólido.

2.4.4.1. Acidificación de la solución

Al momento de haber filtrado la fracción no soluble, queda una fracción soluble que sí contiene sustancias húmicas extraídas, esta solución tiene un pH alcalino por lo que para poder proceder al fraccionamiento se la acidificó hasta un pH 2, con la adición de ácido clorhídrico al 50%v/v.

Fotografía II-11. Ácido clorhídrico 50 % v/v

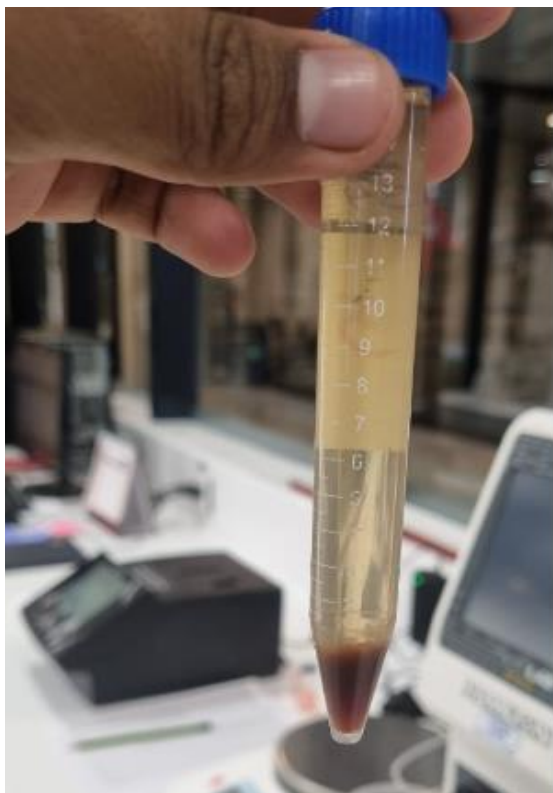


Fuente: Elaboración propia, 2026

2.4.4.2. Toma de muestra y sedimentación

Se tomaron 15ml de la solución acidificada y con ayuda de una pipeta se trasvasaron a un tubo Falcon de 15ml, posteriormente se la dejó en reposo para que los ácidos húmicos precipiten y los fúlvicos queden en solución. Este reposo duró 24 horas.

Fotografía II-12. Reposo de las sustancias húmicas en tubo Falcon

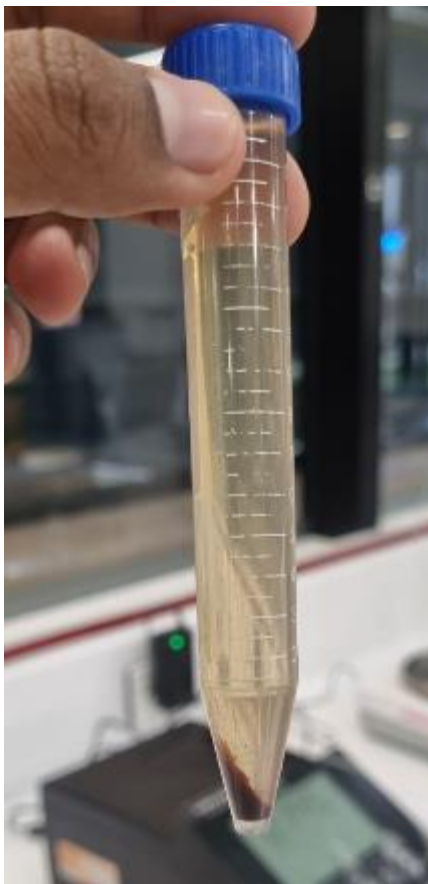


Fuente: Elaboración propia, 2026

2.4.4.3. Centrifugado y fraccionamiento

Una vez que la solución haya reposado, se la llevó a una centrifugadora a 3500 revoluciones por minuto durante 15 minutos, teniendo como resultado el fraccionamiento de los ácidos húmicos y fúlvicos y confirmando la correcta extracción.

Fotografía II-13. Ácidos húmicos y fúlvicos tras centrifugación



Fuente: Elaboración propia, 2026

El color de los ácidos fúlvicos correspondió a los colores explicados en la teoría, es decir, un color amarillento claro, mientras que los ácidos húmicos se precipitaron y presentaron un color café oscuro, también correspondiente a la teoría.

CAPITULO III

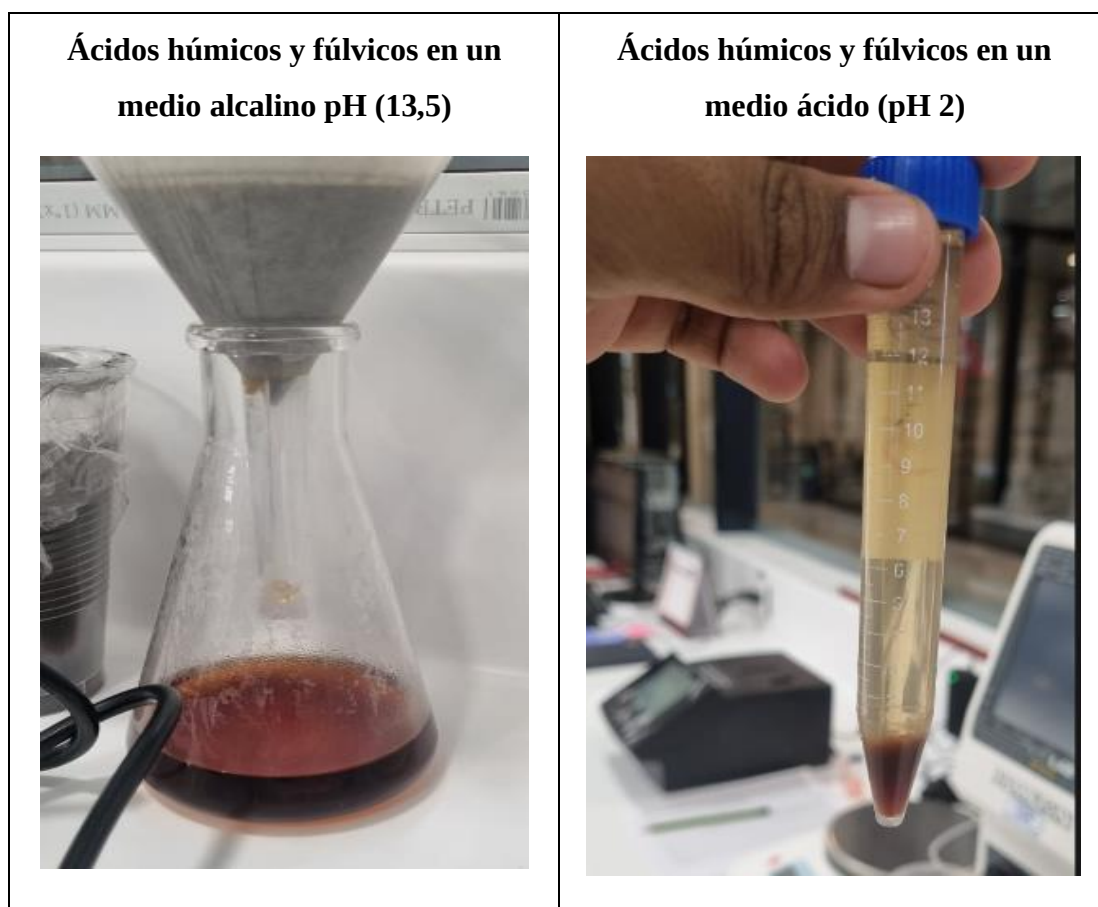
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Resultados obtenidos de la experimentación planteada

3.1.1. Resultados cualitativos

Los ácidos húmicos y fúlvicos presentaron las características mencionadas en la teoría, en donde los ácidos húmicos y fúlvicos son solubles en un medio alcalino (pH 13,5) de un color bronceado oscuro y que una vez extraídos, al acidificarlos hasta un $\text{pH} \leq 2$, los ácidos húmicos tienen un comportamiento floculante y precipitan mientras que los fúlvicos permanecen en solución.

Fotografía III-1. Ácidos húmicos y fúlvicos en diferentes medios



Fuente: Elaboración propia, 2026

3.1.2. Resultados cuantitativos

Tras haber realizado la experimentación de los 24 tratamientos, se obtuvieron los valores de la masa inicial (m_o), la masa del papel (m_p) y la masa total (m_T), con estos

valores se pudieron calcular los valores de masa seca (m_s), masa del residuo (m_r) y la masa extraída (m_{ext}) (ANEXO 4).

Finalmente, con los valores calculados previamente, se pudo obtener el % de rendimiento, que se observa en las siguientes tablas:

Tabla III-1. Datos del diseño experimental

N°	Replicas	Temperatura (°C)	Tiempo (h)	Relación S:L (g:ml)	% Rendimiento
1	I	25 ± 2	1	1:5	6,52
2		60	1	1:5	6,09
3		25 ± 2	3	1:5	6,62
4		60	3	1:5	6,33
5		25 ± 2	1	1:10	6,79
6		60	1	1:10	5,85
7		25 ± 2	3	1:10	7,94
8		60	3	1:10	7,52

9	II	25 ± 2	1	1:5	6,32
10		60	1	1:5	6,45
11		25 ± 2	3	1:5	6,98
12		60	3	1:5	6,04
13		25 ± 2	1	1:10	7,15
14		60	1	1:10	6,34
15		25 ± 2	3	1:10	7,60
16		60	3	1:10	7,18

17	III	25 ± 2	1	1:5	6,87
18		60	1	1:5	5,86
19		25 ± 2	3	1:5	6,35
20		60	3	1:5	6,56
21		25 ± 2	1	1:10	6,52
22		60	1	1:10	6,01
23		25 ± 2	3	1:10	8,19
24		60	3	1:10	7,09

Fuente: Elaboración propia, 2026

De acuerdo con los resultados obtenidos, se tiene que el experimento 23, con factores de una temperatura de 25°C, 3 horas y relación 1:10, tuvo el mejor rendimiento con un valor de 8,19%. Asimismo, analizando los datos con los valores promedios de cada combinación experimental, se tienen los siguientes resultados:

Tabla III-2. Rendimientos de las experimentaciones

		Relación S:L			
		1:5		1:10	
		Tiempo			
		1hrs	3hrs	1hrs	3hrs
Temperatura	25°C	6,52	6,62	6,79	7,94
		6,32	6,98	7,15	7,60
		6,87	6,35	6,52	8,19
	60°C	6,09	6,33	5,85	7,52
		6,45	6,04	6,34	7,18
		5,86	6,56	6,01	7,09

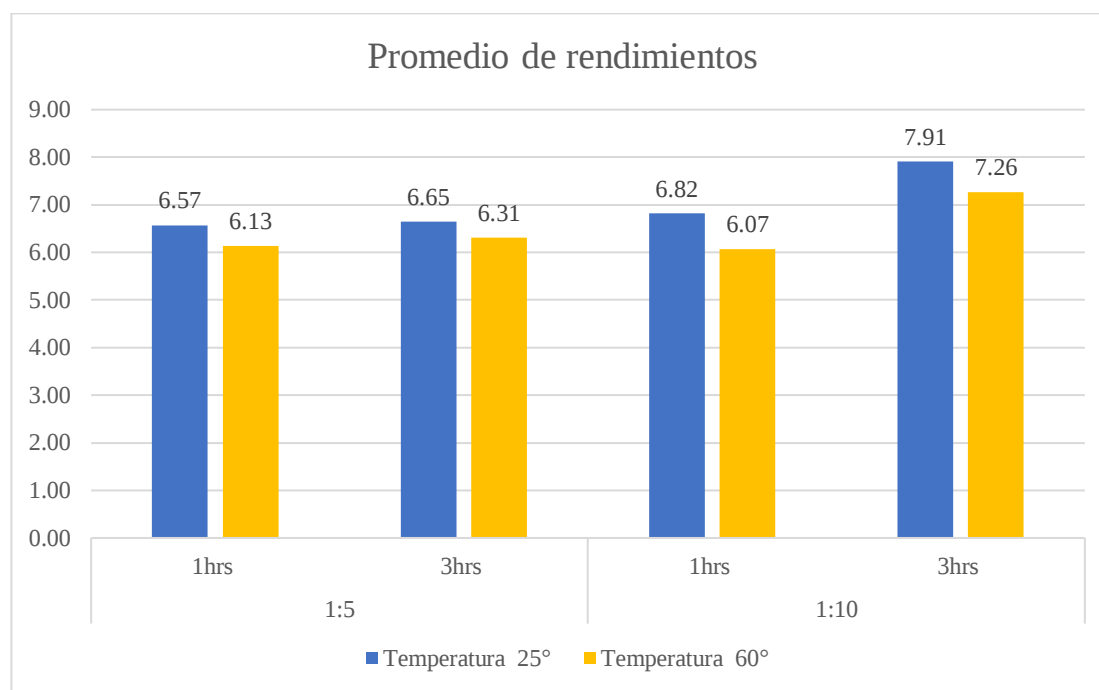
Fuente: Elaboración propia, 2026

Tabla III-3. Promedio de los rendimientos para las combinaciones iguales

		Relación S:L			
		1:5		1:10	
		Tiempo			
		1hrs	3hrs	1hrs	3hrs
Temperatura	25°	6,57	6,65	6,82	7,91
	60°	6,13	6,31	6,07	7,26

Fuente: Elaboración propia, 2026

Figura III-1. Promedio del rendimiento de las experimentaciones



Fuente: Elaboración propia, 2026

Observando la gráfica, se puede concluir sin un análisis estadístico que el promedio muestra un mejor resultado para aquellas experimentaciones con una temperatura de 25°C, un tiempo de 3 horas y una relación S:L de 1:10, esto con un valor de 7,91%.

3.2. Análisis estadístico del diseño experimental

Tras haber concluido con la experimentación y haber obtenido los datos, estos fueron evaluados mediante un análisis de varianza (ANOVA) y una regresión lineal, para ambos análisis se utilizó Microsoft Excel, mediante el paquete estadístico Real Statics Resource Packs.

Esto con el objetivo de saber si los factores elegidos afectan al rendimiento o simplemente las diferencias observadas son productos del azar experimental.

3.2.1. Estadísticas descriptivas

El análisis para la obtención de las estadísticas descriptivas fue realizado mediante un análisis de modelo lineal general univariado, obteniendo las medias, las desviaciones y el número N de valores tomados, todo esto para los tres factores elegidos.

Tabla III-4. Estadísticas descriptivas del diseño experimental

Temperatura	Tiempo	Relación S:L	N°	Media	Varianza
25			12	6,98692038	0,38530515
60			12	6,44366893	0,30176203
	1		12	6,39788987	0,16514203
	3		12	7,03269944	0,46309184
		1:10	12	7,01528507	0,54519542
		1:5	12	6,41530424	0,10649638
25	1		6	6,69433569	0,08961896
25	3		6	7,27950507	0,55259844
60	1		6	6,10144405	0,06278121
60	3		6	6,78589382	0,32001236
25		1:10	6	7,36528551	0,43151513
25		1:5	6	6,60855525	0,07257178
60		1:10	6	6,66528463	0,47391405
60		1:5	6	6,22205324	0,07208998
	1	1:10	6	6,44413909	0,23466936
	1	1:5	6	6,35164064	0,12350954
	3	1:10	6	7,58643105	0,18186202
	3	1:5	6	6,47896784	0,10105517
25	1	1:10	3	6,82044105	0,09908006
25	1	1:5	3	6,56823033	0,07725965
25	3	1:10	3	7,91012997	0,08914132
25	3	1:5	3	6,64888017	0,0992915
60	1	1:10	3	6,06783713	0,06278384
60	1	1:5	3	6,13505096	0,09078091
60	3	1:10	3	7,26273212	0,05117077
60	3	1:5	3	6,30905552	0,06673584
TOTAL			24	6,715	0,40558573

Fuente: Elaboración propia, 2026

3.2.2. Análisis de Varianza

Una vez obtenidas las estadísticas descriptivas, se realizó un Análisis de Varianza, comparando las medias de los factores y con esto determinar la significancia de los datos y así mismo encontrar la estadística F y el p -valor para un intervalo de confianza del 95%.

Tabla III-5. Pruebas de efectos Inter sujetos

ANOVA				Alpha	0,05		
	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	F	p-value	p eta-sq	
Temperatura	1,770732809	1	1,770732809	22,264831	0,00023187	0,58186147	SIG
Tiempo	2,417899182	1	2,417899182	30,4021681	4,7164E-05	0,65518853	SIG
Relación S:L	2,15986196	1	2,15986196	27,1576611	8,5679E-05	0,62926629	SIG
T x t	0,014784896	1	0,014784896	0,18590225	0,67210207	0,01148544	NO SIG
T x R S:L	0,147422313	1	0,147422313	1,85365792	0,19222434	0,10382511	NO SIG
t x R S:L	1,545230171	1	1,545230171	19,4294071	0,00043998	0,54839775	SIG
T x t x R S:L	5,26705E-05	1	5,26705E-05	0,00066227	0,97978729	4,139E-05	NO SIG
Within	1,272487763	16	0,079530485				
Total	9,328471765	23	0,405585729				

Fuente: Elaboración propia, 2026

Para la experimentación, la suma de cuadrados indica la variabilidad del rendimiento, teniendo una variabilidad total de 9,32, y en donde existe una influencia mayoritaria para el tiempo, con un valor de 2,41, debido a que el diseño tiene dos niveles, los grados de libertad son de 1 para todos los factores.

La media cuadrática coincide con la suma de cuadrados, esto debido a los grados de libertad, por otro lado, el error experimental de la media cuadrática es de 0,41.

El factor estadístico “ F ” indica la variación de cada factor producida por el error experimental, teniendo como valor máximo el valor F del tiempo de 30,402 concluyendo que el tiempo es el valor que más efecto tiene.

Los resultados muestran $p\text{-value} \leq 0,05$ para los factores lineales de Temperatura, tiempo y relación S:L, es decir, sí son significativos y afectan la rendimiento, por otro lado, la interacción de **Temperatura×Relación S:L también es significativa**, pero por cuestiones de evitar sesgos y enmascaramientos en los resultados (ANEXO 5), además de que el modelo a utilizar es un modelo aditivo de efectos principales y finalmente el

propósito de la ecuación es tener una predicción del rendimiento dentro del dominio experimental estudiado, se decide no incorporar dicha interacción.

Finalmente, el valor de la eta cuadrada indica cuál de los factores explica más la varianza o está asociada al rendimiento, teniendo como factor más influente al tiempo con un 65,5%.

3.2.3. Modelo multi lineal aditivo de efectos principales

Para la obtención del modelo matemático se realizó una regresión lineal con las variables significativas, es decir con la temperatura, tiempo y relación S:L como variables independientes X , así mismo se designó al rendimiento como variable dependiente Y . El ajuste del modelo matemático se muestra en la siguiente tabla:

Tabla III-6. Modelo matemático ajustado

Analisis de regresión				
OVERALL FIT				
R	0,824954706		AIC	-42,0673114
R cuadrado	0,680550267		AICc	-38,7339781
R cuadrado ajustado	0,632632807		SBC	-37,3550961
Error estandar	0,386003744			
Observaciones	24			

Fuente: Elaboración propia, 2026

En el modelo matemático ajustado podemos observar un 82,50% de correlación entre el modelo matemático y los datos experimentales, indicando una relación muy fuerte.

Asimismo, el modelo explica un 68,06% de la variabilidad observada en el rendimiento y con el ajuste se explica un 63,26%, teniendo un error de la ecuación del $\pm 0,39$.

Así mismo se realizó un análisis de varianza de la regresión teniendo los siguientes resultados:

Tabla III-7. Anova de la regresión

ANOVA				Alpha	0,05	
	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Media cuadrática</i>	<i>F</i>	<i>p-value</i>	<i>sig</i>
Regresión	3	6,348493951	2,11616465	14,2025531	3,4488E-05	yes
Residuo	20	2,979977814	0,148998891			
Total	23	9,328471765				

Fuente: Elaboración propia, 2026

El ANOVA indica un intervalo de confianza del 95%, teniendo un p-value de 0,000034 indicando significancia de la regresión, así mismo el valor alto de F , indicando que sí es un modelo predictivo.

Finalmente, para la construcción de la ecuación se tienen los valores de los coeficientes dados en la siguiente tabla:

Tabla III-8. Coeficientes de la regresión

	<i>Coeficientes</i>	<i>Error estandar</i>	<i>t stat</i>	<i>p-value</i>	<i>Limite inf</i>	<i>Limite sup</i>
Constante	5,840176311	0,35147154	16,61635622	3,5945E-13	5,10701953	6,5733331
Temperatura (°C)	-0,01552147	0,004502439	-3,447346994	0,00254719	-0,02491339	-0,00612955
Tiempo (h)	0,317404788	0,078792684	4,028353523	0,00065839	0,15304613	0,48176345
Relación S/L (g/mL)	0,119996166	0,031517074	3,807338411	0,00110347	0,0542527	0,18573963

Fuente: Elaboración propia, 2026

Los coeficientes se encuentran dentro de los límites establecidos con un intervalo de confianza del 95% tomando en cuenta ambos límites, por lo que la ecuación de la regresión es:

$$y = 5,840 - 0,016 * X_1 + 0,317 * X_2 + 0,121 * X_3$$

Donde:

X_1 : Temperatura (°C)

X_2 : Tiempo (horas)

X_3 : Relación S:L (g:ml)

y : Rendimiento (%)

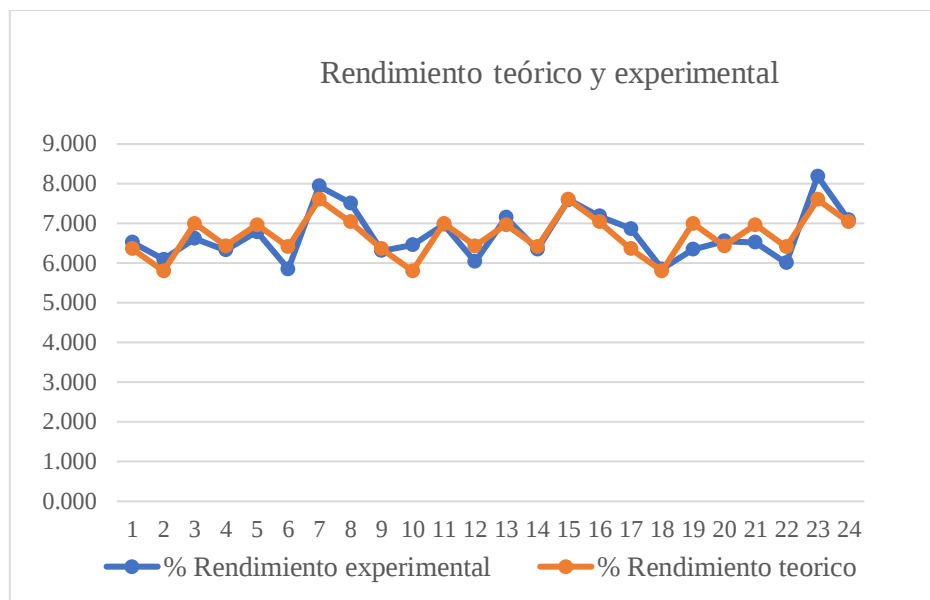
Para verificar la ecuación del modelo matemático se realiza una comparación de los datos de rendimiento obtenidos experimentalmente y los que se obtengan utilizando la ecuación de la regresión:

Tabla III-9. Comparación de rendimientos experimentales y teóricos

N° experimentos	% Rendimiento experimental	% Rendimiento teorico	Error
1	6,523	6,362	-0,161
2	6,094	5,802	-0,292
3	6,619	6,996	0,377
4	6,332	6,436	0,104
5	6,792	6,967	0,175
6	5,854	6,407	0,553
7	7,944	7,601	-0,343
8	7,518	7,041	-0,477
9	6,316	6,362	0,046
10	6,455	5,802	-0,653
11	6,978	6,996	0,018
12	6,040	6,436	0,396
13	7,148	6,967	-0,181
14	6,344	6,407	0,063
15	7,596	7,601	0,005
16	7,181	7,041	-0,140
17	6,866	6,362	-0,504
18	5,857	5,802	-0,055
19	6,350	6,996	0,646
20	6,555	6,436	-0,119
21	6,521	6,967	0,446
22	6,006	6,407	0,401
23	8,191	7,601	-0,590
24	7,088	7,041	-0,047

Fuente: Elaboración propia, 2026

Figura III-2. Gráfica de rendimientos experimentales y teóricos



Fuente: Elaboración propia, 2026

3.3. Análisis del producto y su uso como bioinsumo agrícola

La presencia cuantitativa de los ácidos húmicos y fúlvicos fueron una variable respuesta secundaria del diseño experimental planteado, es por eso que se realizó un análisis de laboratorio del experimento con el mejor rendimiento obtenido, en este caso del experimento N°23, asimismo se adaptó el pH de la solución madre de SH para su uso en viña.

3.3.1. Análisis de laboratorio de ácidos húmicos y fúlvicos

Específicamente para este caso en especial, se realizó un análisis cuantitativo de riqueza de AH y AF para una fracción obtenida por el método, esto por gravimetría en laboratorios del Centro de Investigaciones Químicas S.R.L., este análisis se hizo únicamente a la experimentación con mejor rendimiento, que es la experimentación N°23, con un tiempo de 3 horas, 25°C y una relación 1:10.

Tabla III-10. Resultados de los análisis de AH y AF

Característica	Cantidad
Ácidos húmicos	192,10 g/Kg
Ácidos fúlvicos	151,2 g/Kg

Fuente: CIQ S.R.L., 2026

3.3.2. Comparación con la materia prima

Con los datos de AH y AF podemos obtener el índice de riqueza húmica del producto, que en este caso es de 343,3g/Kg, es importante mencionar otra vez que, este dato es de riqueza o calidad, no de composición.

Anteriormente en el punto **2.1.1.** se menciona una riqueza húmica de la materia prima de 308,5g/Kg, por lo que se puede concluir que el proceso de extracción favoreció a la concentración selectiva de sustancias húmicas, por ende, el producto es de mayor calidad.

3.3.3. Comparación con otros productos

Los ácidos húmicos y fúlvicos como bioinsumo agrícola no tienen una normativa de algún límite o parámetro que establezca un contenido mínimo o máximo de estos ácidos, más al contrario, el uso y dosificación depende mucho de las indicaciones orientativas de la empresa que los produzca y de las pruebas de campo que el consumidor realice.

En las viñas de Casa Real se usaron específicamente dos productos de sustancias húmicas, el bioinsumo “Biocat 15” de la empresa Atlántica Agrícola S.A. y los AH y AF sintetizados por la propia empresa en su Biofactoria.

Estos productos contienen ciertas características que se pueden comparar con el producto obtenido en este proyecto, entre las más importantes están los AH, AF, el pH y la dosificación.

Tabla III-11. Características del Biocat 15

Característica	Cantidad
Ácidos húmicos	7% p/p
Ácidos fúlvicos	8% p/p
pH	12,2
Dosificación	10-25 L/Ha

Fuente: Atlántica Agrícola S.A

Por otro lado, los AH y AF sintetizados en la Biofactoria de Casa Real, asesorado por el experto en el tema, Jairo Restrepo Rivera, en donde las características de dicho producto son las siguientes:

Tabla III-12. Características de los AH y AF de la Biofactoria

Característica	Cantidad
Ácidos húmicos	13,7g/100g
Ácidos fúlvicos	5,6g/100g
pH	6,5 – 8
Dosificación final	35L/Ha

Fuente: SAIV Ltda., 2026

Tabla III-13. Comparación entre productos

Característica	Biocat 15	SAIV Ltda.	Este proyecto
Ácidos Húmicos	7%p/p	13,7g/100g	19,21g/100g
Ácidos fúlvicos	8%p/p	5,6g/100g	15,12g/100g
pH	12,2	6,5 – 8	13,5
Dosificación	10-25L/Ha	35L/Ha (final)	--

Fuente: Elaboración propia, 2026

3.3.4. Adaptación como Bioinsumo

Como se observa en la tabla anterior, existe una diferencia en comparación con ambos productos utilizados en las viñas de Casa real, si hablamos puntualmente de la concentración de AH y AF, se recomienda la dilución o la concentración mediante evaporación de la solución, esto dependerá de la necesidad y de las pruebas de campo que el consumidor realice.

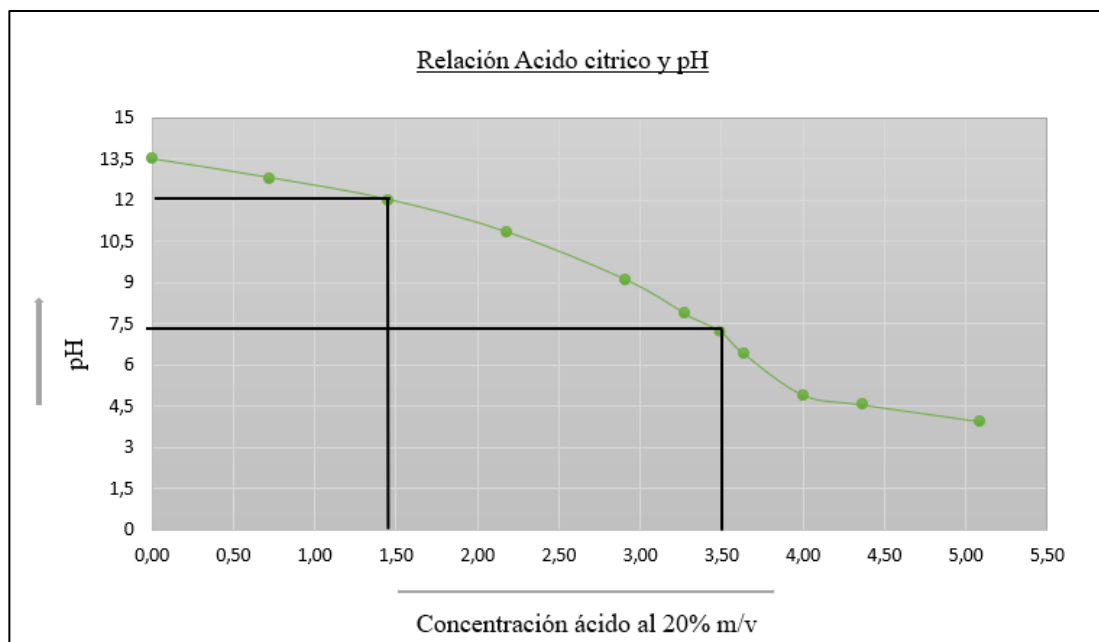
Por otro lado, el pH es un factor que se puede manipular mediante la adición de Ácido Cítrico. Para determinar las cantidades necesarias, se realizaron pruebas en donde se añadieron distintos volúmenes de una solución de ácido cítrico 20 %m/v a una muestra de 27,5ml de la solución de SH, después de cada adición se midió el pH para determinar la relación de adición, por consiguiente, se tiene la siguiente tabla:

Tabla III-14. Adición de ácido cítrico y su relación con el pH

N°	Volumen ácido (ml)	pH	Masa del ácido (g)	Concentración (%m/v)
1	0	13,5	0	0,00
2	1	12,81	0,2	0,73
3	2	12,02	0,4	1,45
4	3	10,84	0,6	2,18
5	4	9,11	0,8	2,91
6	4,5	7,89	0,9	3,27
7	4,8	7,22	0,96	3,49
8	5	6,41	1	3,64
9	5,5	4,91	1,1	4,00
10	6	4,55	1,2	4,36
11	7	3,94	1,4	5,09

Fuente: Elaboración propia, 2026

Figura III-3. Relación ácido cítrico y pH



Fuente: Elaboración propia, 2026

De acuerdo a los productos mencionados anteriormente, se resaltan los niveles donde el $\text{pH} \approx 12$ y ≈ 7 , la decisión final se determina mediante pruebas de campo en el viñedo, la eficiencia que este tenga y finalmente su costo en relación a la cantidad de reactivo utilizado, donde todo esto depende netamente de las necesidades y posibilidades del consumidor, en este caso, Casa Real.

Finalmente, la dosificación del producto sintetizado en este proyecto al igual que las características anteriores, dependerá de las pruebas de campo y de las necesidades que se requiera en la determinada campaña.

3.3.5. Análisis final del producto

Tomando en cuenta los valores estadísticos del rendimiento y la significancia de los factores, los análisis de laboratorio respecto a la calidad del producto, además del ácido cítrico necesario para manipulación del pH, se tiene la siguiente tabla con los datos característicos del producto:

Tabla III-15. Características finales del producto como bioinsumo

Indicador	Medición	Resultado
Rendimiento	Cantidad extraída	8,19 %
Riqueza húmica	Calidad del extracto	343,3 g/Kg
AH	Calidad específica	192,1 g/Kg
AF	Calidad específica	151,2 g/Kg
pH	Adaptabilidad como bioinsumo	13,5
Ácido cítrico	Para pH 12 (Biocat 15)	1,45 %m/v
	Para pH 7 (SAIV Ltda.)	3,49 %m/v
Dosificación	Mediante pruebas de campo tomando como base orientativa las dosificaciones de SAIV y el Biocat.	

Fuente: Elaboración propia, 2026

3.4. Balance de materia y energía

3.4.1. Balance de materia

El balance de materia se realizó únicamente para dos experimentos que tuvieron los mejores rendimientos de las temperaturas de 60° y de 25°C.

Tabla III-16. Experimentos con mejores rendimientos para el balance

N°	Temperatura (°C)	Tiempo (h)	Relación S:L (g:ml)	% Rendimiento
8	60	3	1:10	11,27
23	25	3	1:10	11,92

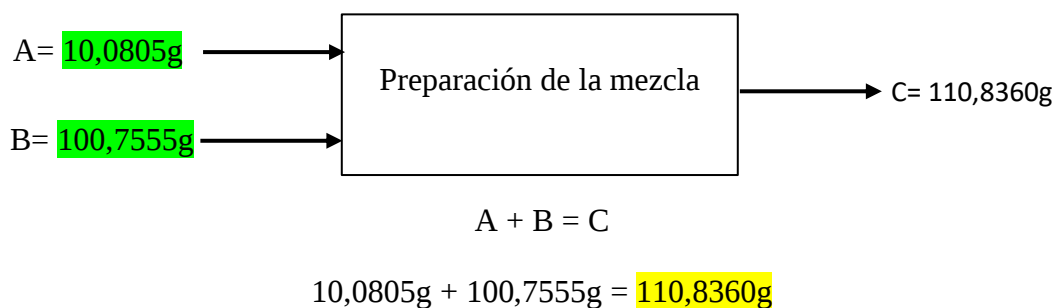
Fuente: Elaboración propia, 2026

Los balances se realizarán por etapas, considerando perdidas.

3.4.1.1. Balance de materia para el experimento N°23

3.4.1.1.1 Etapa de preparación de la mezcla

Para determinar el peso exacto de la mezcla, se pesó la leonardita y la solución alcalina.



Donde:

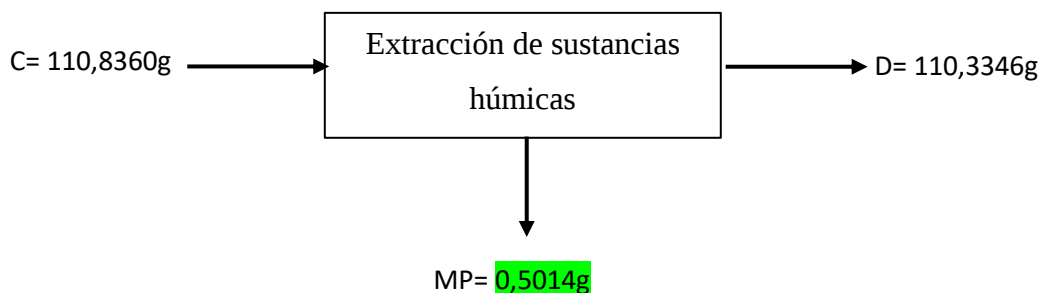
A: Leonardita

B: Solución alcalina

C: Corriente de la mezcla

3.4.1.1.2. Extracción de sustancias húmicas

La extracción se llevó a cabo a temperatura ambiente (25°C), durante 3 horas en una relación sólido – líquido de 1:10, al momento de trasvasar hacia el papel filtro, hubo adherencia de la mezcla en las paredes del vaso de precipitado, estas fueron mínimas, pero aun así se las tomaron en cuenta y se pesaron para el balance.



$$C = MP + D$$

$$110,8360\text{g} = 0,5014\text{g} + 110,3346\text{g}$$

Donde:

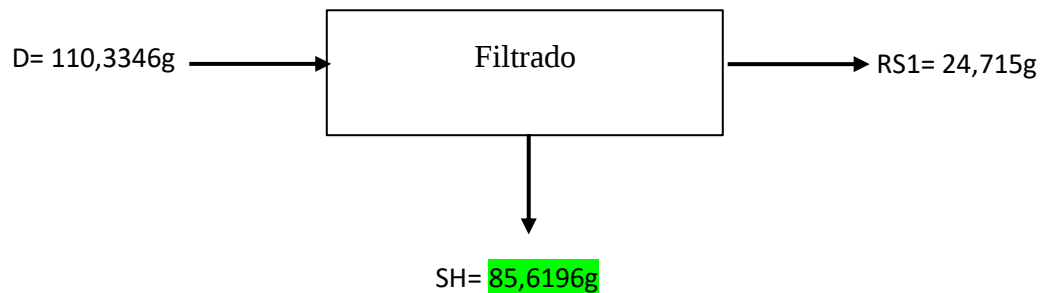
C: Corriente de la mezcla

MP: Masa perdida por adherencia

D: Mezcla con sustancias húmicas extraídas

3.4.1.1.3. Filtrado

Tras la extracción, se trasvasó toda la mezcla hacia un papel filtro para separar la fase líquida de la fase sólida, donde en la fase líquida se encontraban las sustancias húmicas extraídas y en la fase sólida estaba toda la materia prima que no se extrajo, se pesó la solución líquida para determinar el balance.



$$D = SH + RS1$$

$$110,3346\text{g} = 85,6196\text{g} + 24,7150\text{g}$$

Donde:

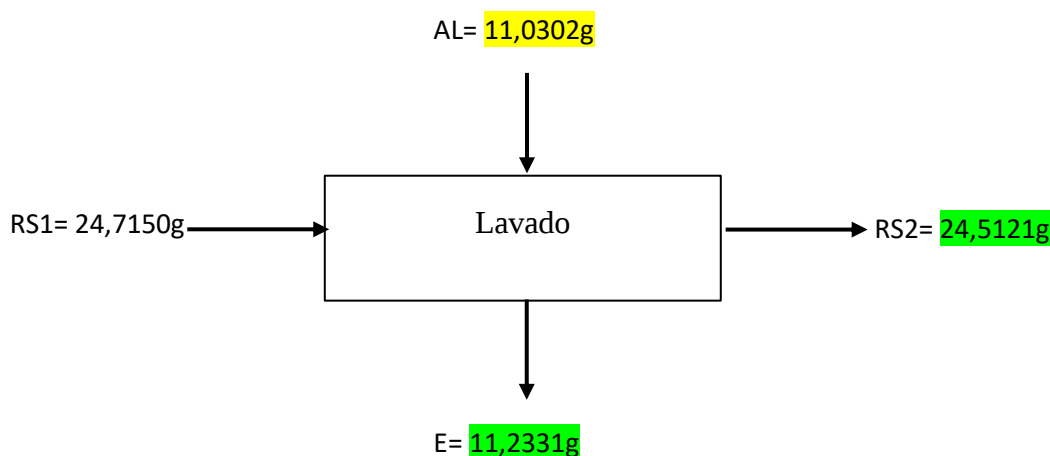
D: Mezcla con sustancias extraídas

SH: Solución de sustancias húmicas extraídas

RS1: Residuo húmedo no extraído

3.4.1.1.4. Lavado

Tras haber filtrado la mezcla de sustancias húmicas, se procedió a lavar la fase sólida retenida en el papel filtro, esto con el propósito de extraer el KOH residual que podría haber quedado sin reaccionar, aproximadamente se utilizaron 11 mililitros de agua destilada y con ayuda de una piseta se procedió a enjuagar hasta que el agua de lavado tuvo un pH aproximado de 8, se pesó el agua de enjuague y el residuo sólido tomando en cuenta la resta de la masa del papel filtro para determinar el balance.



$$RS1 + AL = E + RS2$$

$$24,7150g + 11,0302g = 11,2331g + 24,5121g$$

Donde:

RS1: Residuo húmedo no extraído

AL: Agua de lavado

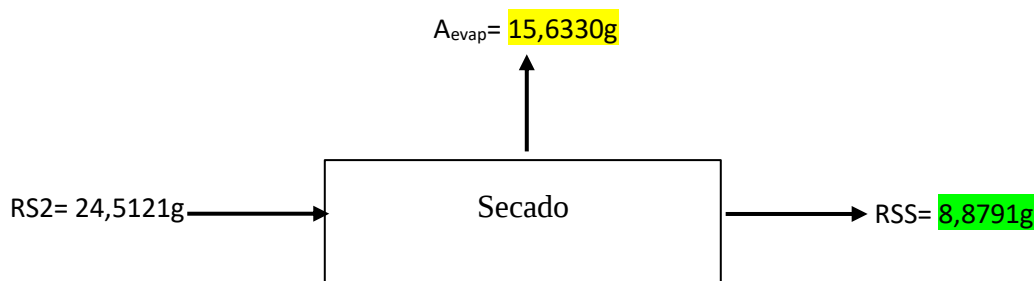
E: Agua de enjuague

RS2: Residuo húmedo lavado

3.4.1.1.5. Secado

El residuo sólido húmedo y lavado fue llevado a una estufa a 105°C hasta peso constante, para eliminar la humedad y así tener la masa seca no extraída, obteniendo indirectamente la masa extraída que correspondería a las sustancias húmicas y así poder determinar el rendimiento global del proceso.

Se pesó la masa seca no extraída restando el peso del papel filtro, así para poder determinar el agua evaporada.



$$RS2 = A_{evap} + RSS$$

$$24,5121g = 15,6330g + 8,8791g$$

Donde:

RS2: Residuo húmedo lavado

A_{evap} : Agua evaporada

RSS: Residuo sólido seco

3.4.1.1.6. Rendimiento global del proceso

Tras obtener el peso seco del residuo sólido no extraído, indirectamente se calcula lo que sí se extrajo, en este caso mediante la diferencia del RSS y la masa de la leonardita inicial A:

$$\text{Masa extraída} = A - RSS$$

$$\text{Masa extraída} = 10,0805g - 8,8791g$$

$$\text{Masa extraída} = 1,2014g$$

Es importante mencionar que el rendimiento global del proceso es definido como la cantidad de materia prima que se aprovechó y que por ende fue extraída en la relación con la cantidad de materia prima inicial, sin tomar en cuenta su porcentaje de humedad o cenizas. En este caso el rendimiento es:

$$\text{Rendimiento global del proceso} = \frac{\text{Masa extraída}}{\text{Masa de materia prima inicial}} * 100\%$$

$$\text{Rendimiento global del proceso} = \frac{1,2014\text{g}}{10,0805} * 100\%$$

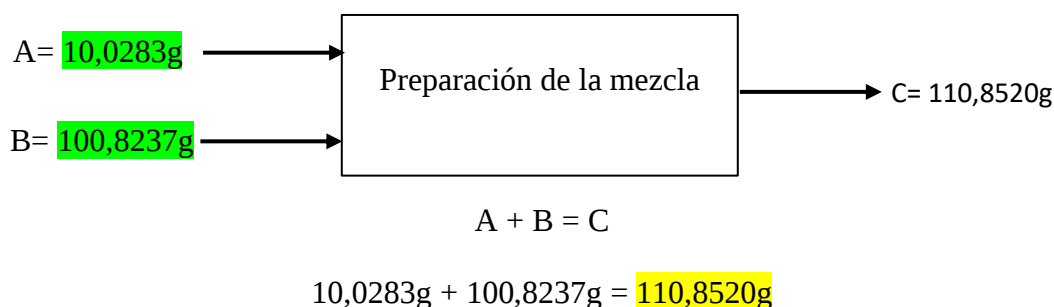
$$\text{Rendimiento global del proceso} = 11,9181\%$$

3.4.1.2. Balance de materia para el experimento N°8

Al igual que el experimento N°23, el experimento N°8 se realizó de la misma manera, las etapas son las mismas, con la única variación al momento de extraer donde se utilizó una temperatura de 60°C y se pudo observar pérdida de masa por evaporación.

3.4.1.2.1. Etapa de preparación de la mezcla

Al igual que en el experimento N°23, se pesó la leonardita y la solución alcalina.



Donde:

A: Leonardita

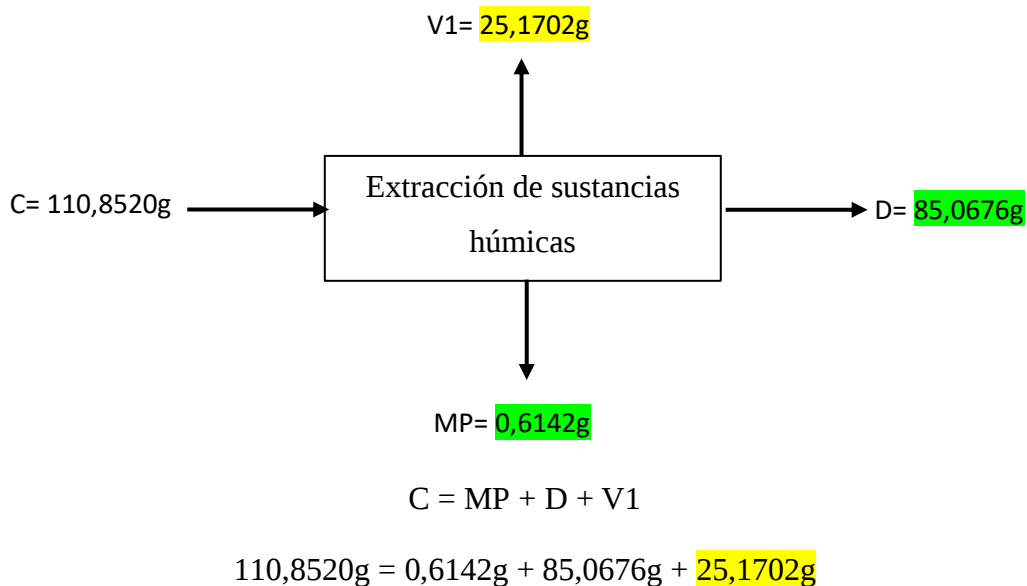
B: Solución alcalina

C: Corriente de la mezcla

3.4.1.2.2. Extracción de sustancias húmicas

La extracción se llevó a cabo a una temperatura de 60°C durante 3 horas en una relación sólido – líquido de 1:10, a diferencia del experimento N°23, en esta etapa de extracción hubo pérdida de masa por evaporación, esto debido a los 60°C otorgados por el baño

María, asimismo, se registraron pérdidas por adherencia al vaso de precipitado, pero estas fueron mínimas.



Donde:

C: Corriente de la mezcla

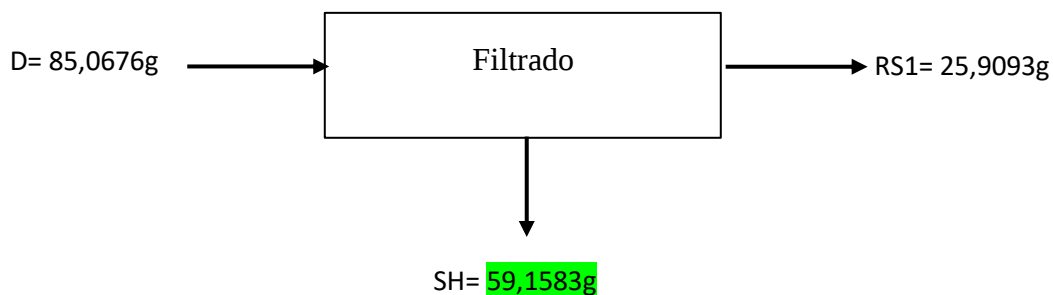
MP: Masa perdida por adherencia

D: Mezcla con sustancias húmicas extraídas

V1: Agua evaporada en baño maría

3.4.1.2.3. Filtrado

Al igual que el experimento N°23, se trasvasó la mezcla al papel filtro para separar la fase solida de la liquida, se pesó la solución líquida para determinar el balance.



$$D = SH + RS1$$

$$85,0676g = 59,1583g + 25,9093g$$

Donde:

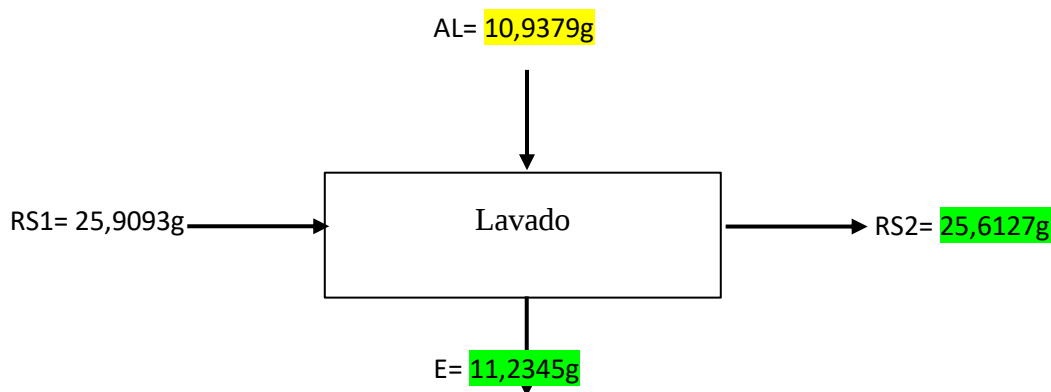
D: Mezcla con sustancias extraídas

SH: Solución de sustancias húmicas extraídas

RS1: Residuo húmedo no extraído

3.4.1.2.4. Lavado

Al igual que el experimento N°23 se realizó un lavado para eliminar el posible KOH residual, se pesó el agua de enjuague y el residuo sólido tomando en cuenta la resta de la masa del papel filtro para determinar el balance.



$$RS1 + AL = E + RS2$$

$$25,9093g + 10,9379g = 11,2345g + 25,6127g$$

Donde:

RS1: Residuo húmedo no extraído

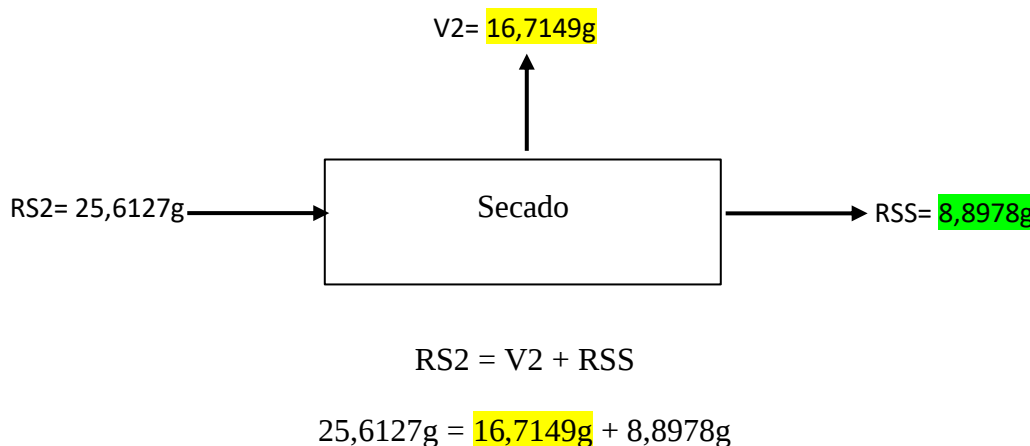
AL: Agua de lavado

E: Agua de enjuague

RS2: Residuo húmedo lavado

3.4.1.2.5. Secado

Al igual que el experimento N°23, el residuo sólido húmedo y lavado fue llevado a una estufa a 105°C hasta peso constante, para eliminar la humedad y así tener la masa seca no extraída. Se pesó la masa seca no extraída restando el peso del papel filtro, así para poder determinar el agua evaporada.



Donde:

RS2: Residuo húmedo lavado

V2: Agua evaporada en estufa

RSS: Residuo sólido seco

3.4.1.2.6. Rendimiento global del proceso

Tras obtener el peso seco del residuo sólido no extraído, indirectamente se calcula lo que sí se extrajo, en este caso mediante la diferencia del RSS y la masa de la leonardita inicial A:

$$\text{Masa extraída} = A - RSS$$

$$\text{Masa extraída} = 10,0283g - 8,8978g$$

$$\text{Masa extraída} = 1,1305g$$

Es importante mencionar que el rendimiento global del proceso es definido como la cantidad de materia prima que se aprovechó y que por ende fue extraída en la relación

con la cantidad de materia prima inicial, sin tomar en cuenta su porcentaje de humedad o cenizas. En este caso el rendimiento es:

$$\text{Rendimiento global del proceso} = \frac{\text{Masa extraída}}{\text{Masa de materia prima inicial}} * 100\%$$

$$\text{Rendimiento global del proceso} = \frac{1,1305\text{g}}{10,0283} * 100\%$$

$$\text{Rendimiento global del proceso} = 11,2731\%$$

3.4.2. Balance de energía

El balance de energía se realizó únicamente para el experimento N°8, que tiene la variable temperatura a 60°C; para el experimento N°23 realizado a temperatura ambiente, no se consideró un balance de energía debido a que el sistema operó bajo condiciones aproximadamente isotérmicas, sin un aporte externo significativo de calor y sin variaciones de temperatura durante el proceso, asimismo las etapas que se evaluarán son la etapa de extracción y la etapa de secado.

3.4.2.1. Balance de energía en la extracción

Para el balance de energía en la extracción se tomó en cuenta el calor absorbido por la leonardita y el agua, que sería el CALOR SENSIBLE, y por otro lado se tomó en cuenta la fracción de agua evaporada que sería el CALOR LATENTE, teniendo los calores específicos de la siguiente manera:

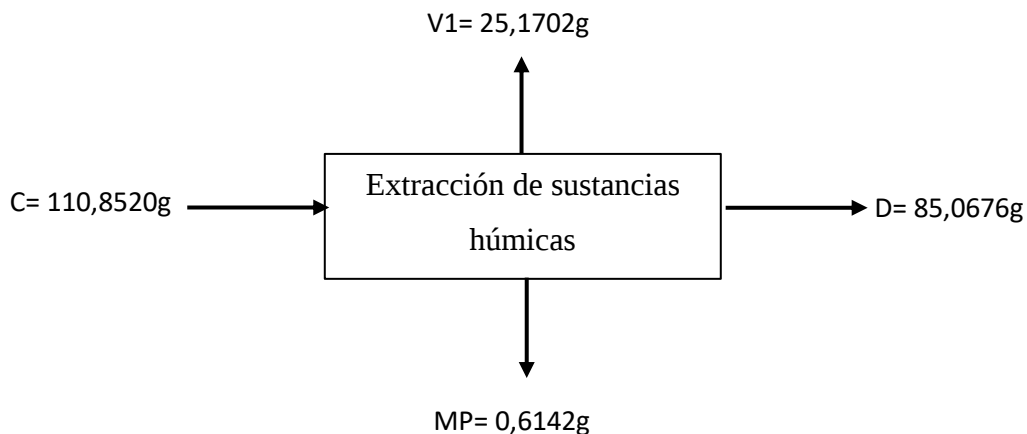
Tabla III-17. Datos para el balance de energía

Insumo	Cp (J/g.°C)	λ (J/g)
Leonardita	1,30	--
Agua	4,18	2257

Fuente: Perry, 2018

Es importante mencionar que los valores de calor específico para la leonardita no son únicos, por lo que se basó en el Cp de materiales carbonosos y lignitos presentes en el

libro de Perry “Manual del ingeniero químico”, 2018. Estos valores van de 1,0 a 1,6 (J/g.°C).



Donde:

C: Corriente de la mezcla

MP: Masa perdida por adherencia

D: Mezcla con sustancias húmicas extraídas

V1: Agua evaporada en baño maría

Entonces, teniendo los datos de masas y calores, se calcula el $C_{p_{mezcla}}$:

$$C_{p_{mezcla}} = \frac{(m_{leonardita} * C_{p_{leonardita}}) + (m_{agua} * C_{p_{agua}})}{m_{mezcla}}$$

$$C_{p_{mezcla}} = \frac{(10,0283 * 1,30) + (100,8237 * 4,18)}{110,8520}$$

$$C_{p_{mezcla}} = 3,92 \text{ J/g.}^{\circ}\text{C}$$

Entonces el calor absorbido es:

$$Q_{abs} = Q_{sensible} + Q_{latente}$$

$$Q_{abs} = C * C_{p_{mezcla}} * \Delta T + V1 * \lambda_{vap}$$

$$Q_{\text{abs}} = 110,8520 * 3,92 * (60-25) + 25,1702 * 2257$$

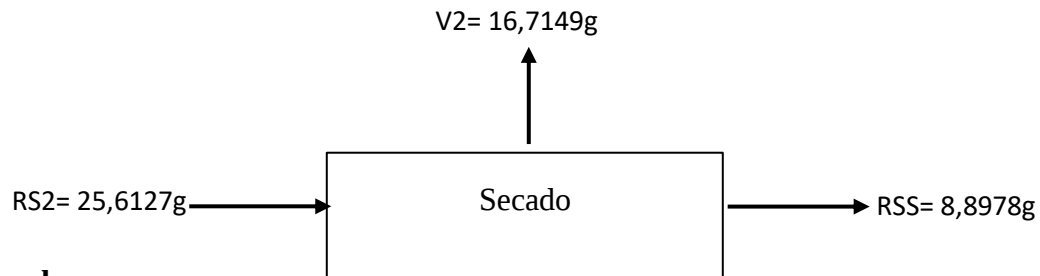
$$Q_{\text{abs}} = 72\,018,0358 \text{ Joules}$$

$$Q_{\text{abs}} = 72,02 \text{ kJ}$$

Es importante mencionar que el mayor consumo energético en la etapa de extracción fue para evaporar el agua, con 56,86kJ.

3.4.2.2. Balance de energía en la estufa

Para el balance de energía en la estufa es importante tomar en cuenta un nuevo calor específico tomando en cuenta la fracción sólida y líquida en el residuo húmedo:



Donde:

RS2: Residuo húmedo lavado

V2: Agua evaporada en estufa

RSS: Residuo sólido seco

Entonces el Cp del residuo sólido húmedo es:

$$Cp_{\text{residuo húmedo}} = \frac{(m_{\text{leonardita}} * Cp_{\text{leonardita}}) + (m_{\text{agua}} * Cp_{\text{agua}})}{m_{\text{mezcla}}}$$

$$Cp_{\text{residuo húmedo}} = \frac{(8,8978 * 1,30) + (16,7149 * 4,18)}{25,6127}$$

$$Cp_{\text{residuo húmedo}} = 3,18 \text{ J/g.}^{\circ}\text{C}$$

Entonces el calor absorbido es:

$$Q_{\text{abs}} = Q_{\text{sensible}} + Q_{\text{latente}}$$

$$Q_{abs} = C * C_{p_{mezcla}} * \Delta T + V1 * \lambda_{vap}$$

$$Q_{abs} = 25,6127 * 3,18 * (105-25) + 16,7149 * 2257$$

$$Q_{abs} = 44\,241,4002 \text{ Joules}$$

$$Q_{abs} = 44,24 \text{ kJ}$$

Al igual que en la etapa de extracción, el mayor consumo de energía en el secado fue para evaporar el agua, con 37,77 kJ.

3.5. Consumo de energía eléctrica del proceso

El consumo de energía eléctrica está basado en el uso de la estufa, del agitador y de la jarra eléctrica.

Es importante mencionar que la jarra eléctrica solamente se utilizó para calentar el agua del baño María, aproximadamente cada 5 minutos debía calentarse medio litro de agua cuyo calentamiento duraba aproximadamente 30 segundos, todo esto durante 3 horas.

Entonces, para las 3 horas:

$$\text{Ciclos} = \frac{180 \text{ minutos}}{5 \text{ minutos}} = 36 \text{ ciclos}$$

Cada ciclo duraba aproximadamente 30 segundos de calentamiento, por lo que:

$$\text{Tiempo de uso} = 30 * 36 = 1080 \text{ segundos}$$

$$\text{Tiempo de uso} = 0,3 \text{ horas} * 12 \text{ experimentaciones}$$

$$\text{Tiempo de uso} = 3,6 \text{ horas}$$

Por consiguiente, los datos son:

Tabla III-18. Potencias y tiempo de uso de los equipos

Equipo	Potencia	Tiempo de uso por experimento	Tiempo de uso total
Agitador	15 W	3 - 1 horas	48 horas (24 experimentaciones.)

Jarra eléctrica	1500 W	0,3 horas	3,6 horas (12 experimentaciones.)
Estufa	*600 W	12 horas	288 horas (24 experimentaciones)

Fuente: Elaboración propia, 2026

*Es importante mencionar que si bien la potencia de la estufa es de 1200W, se asume un factor de utilización del 50%, debido a que el equipo opera mediante un termostato que alterna ciclos para mantener la temperatura requerida.

Entonces, teniendo todos los datos necesarios, la energía eléctrica total consumida por el sistema es:

$$E_{total} = E_{agitador} + E_{estufa} + E_{jarra}$$

$$E_{total} = P_{agitador} * t_{agitador} + P_{estufa} * t_{estufa} + P_{jarra} * t_{jarra}$$

$$E_{total} = 15 * 48 + 600 * 288 + 1500 * 3,6$$

$$E_{total} = 0,72 kWh + 172,80 kWh + 5,40 kWh$$

$$E_{total} = 178,92kWh$$

Donde:

E: Energía eléctrica consumida (kWh)

P: Potencia nominal (W)

t: Tiempo de uso (horas)

3.5.1 Costo del uso de energía eléctrica total del proyecto

Los costos de la energía eléctrica están en función a la energía total utilizada por la tarifa eléctrica industrial brindada por SETAR hacia SAIV Ltda.

Tabla III-19. Costos por equipo

Equipo	Energía consumida (kWh)	Tarifa eléctrica (Bs/kWh)	Costo (Bs)
Agitador	0,72	0,697	0,52

Jarra eléctrica	5,40	0,697	3,764
Estufa	172,80	0,697	120,441
Total = 124,726 Bs			

Fuente: Elaboración propia, 2026

3.6. Evaluación de costos asociados al proyecto

Los costos del proyecto vienen asociados a la materia prima, los insumos, los análisis y el consumo eléctrico.

Tabla III-20. Costos asociados al proyecto

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio (Bs)
Materia prima	Leonardita	Gramos	300	27
Insumos	Hidróxido de potasio	Gramos	100	5
	Agua destilada	Litros	3	60
	Ácido cítrico	Gramos	1000	18,4
Análisis	Caracterización de la materia prima	--	1	1180
	Caracterización del producto	--	1	700
Consumo eléctrico	Estufa de secado, agitador y jarra eléctrica	kWh	351,72	244,749
Total = 2235,149 Bs				

Fuente: Elaboración propia, 2026

CAPITULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- Se caracterizó la leonardita utilizada como materia prima en los laboratorios del Centro de Investigaciones Químicas S.R.L., entre sus características más importantes destacan la riqueza de sustancias húmicas con un valor de 308,5g/Kg y su composición de cenizas con un 80% y de humedad con un 4%.
- Se eligió al método con Hidróxido de Potasio para la obtención de AH y AF, esto debido principalmente a que el Potasio es un macronutriente esencial para el viñedo, mientras que el método con Hidróxido de Sodio puede alcalinizar la tierra, generando perjuicios.
- Se obtuvieron los AH y AF utilizando el método elegido y planteando un diseño experimental donde el modelo fue de factores fijos, las variables definidas fueron tres y cada una con dos niveles, estas variables fueron la Temperatura (25 – 60) °C, tiempo (1 – 3) horas y la relación S:L (1:5 – 1:10) g:ml, por otro lado, combinando cada factor el diseño experimental contó con ocho experimentaciones y este a su vez se replicó tres veces con el fin de estimar el error experimental y aumentar la precisión de los datos, teniendo en total 24 experimentaciones.
- Tras realizar las experimentaciones se obtuvieron los rendimientos, en donde el más alto se obtuvo en el experimento N°23, con una temperatura de **25°C**, tiempo de **3 horas** y una relación **1:10**, este rendimiento fue de 8,19%. Tras promediar los resultados, se reafirma que los niveles anteriormente mencionados son los que obtienen una mejor eficiencia.
- Se aplicó un diseño factorial a los resultados obtenidos, esto para realizar el análisis de varianza (ANOVA), obteniendo la significancia de los factores en función a las pruebas estadísticas, principalmente con los p-valores con una confianza del 95%, donde la Temperatura, el tiempo y la relación S:L son significativos con valores: 0,00023, 0,000047 y 0,000086 respectivamente y no se deben al azar, asimismo se obtuvo que la interacción Tiempo×Relación S:L es significativa con un valor de 0,00044 pero se descarta para evitar sesgos o enmascaramientos entre variables.

- Se aplicó una regresión lineal para determinar el modelo matemático del proceso y a su vez determinar la ecuación de predicción del rendimiento en función a los factores evaluados, se obtuvieron como coeficientes de la ecuación lineal los valores de: 5,840 como constante, el coeficiente de la temperatura con un valor de -0,016, el coeficiente del tiempo con un valor de 0,317 y el coeficiente de la relación S:L con un valor de 0,121, teniendo la ecuación lineal de la siguiente forma:

$$y = 5,840 - 0,016 * T + 0,317 * t + 0,121 * R S : L$$

- Se realizó un análisis de laboratorio del producto obtenido para determinar la calidad del producto, teniendo un índice de riqueza de 343,5g/Kg de sustancias húmicas, mejorando el índice de la materia prima que era de 308,5g/Kg.

- Se comparó el producto obtenido con otros productos utilizados en los viñedos de Casa Real, principalmente con el Biocat 15 y con los AH y AF obtenidos en su biofactoria. Las principales diferencias están en la cantidad de sustancias húmicas presentes, en donde el producto obtenido tiene 343,5g/Kg de SH, el producto de SAIV Ltda. Tiene 193 g/Kg de SH y finalmente el Biocat 15 tiene 15%p/p de SH, asimismo, se tiene un pH alcalino el cual se puede ajustar con ácido cítrico necesitando 1.45%m/v para llegar a un valor de pH 12 (Biocat 15) y 3,49% m/v para un pH 7 (Biofactoria), en donde depende únicamente del consumidor y sus pruebas de campo.

- Se realizó un balance de materia para determinar el rendimiento del proceso, tomando en cuenta lo que entra como materia prima y lo que sale como producto final, teniendo un rendimiento máximo del 11,2% de aprovechamiento.

- Se realizó un balance de energía para determinar la energía absorbida en la etapa del proceso para la extracción alcalina de AH y AF, esto en la experimentación a 60°C, teniendo una energía total absorbida de 72,02kJ.

- Se determinaron los costos asociados al proceso tomando en cuenta el costo de la materia prima, los insumos, de los análisis y de la energía eléctrica utilizada, teniendo un total de 2235,149Bs.

4.2. Recomendaciones

- Se recomienda evaluar los parámetros complementarios de calidad, ya sea la materia orgánica total, la conductividad eléctrica y el contenido de micronutrientes.
- Se recomienda realizar pruebas de campo con el producto sintetizado ajustando el pH a 7 y a 12, evaluar el desempeño agronómico y asimismo evaluar los costos de cada tratamiento, determinando su factibilidad.
- Se recomienda estandarizar la metodología para analizar cuantitativamente los ácidos húmicos y fúlvicos a escala laboratorio y así caracterizarlos de forma independiente, generando menos costos y tiempos de respuesta para la toma de decisiones.
- Se recomienda enriquecer los AH y AF con otros fertilizantes de origen orgánico para potenciar su desempeño agronómico y evaluar estos mismos en pruebas de campo.
- Se recomienda realizar ensayo de campo en diferentes cultivos para validar dosis propuestas y determinar el efecto de las sustancias húmicas sobre el crecimiento, rendimiento y absorción de nutrientes.
- Desarrollar estudios y proyectos para la elaboración del producto a grande escala tomando en cuenta las variables estudiadas durante el proyecto y así mismo optimizar el consumo energético del proceso como ser en la agitación.
- Evaluar la estabilidad del producto a diferentes pH durante determinados tiempos de almacenamiento, tomando en cuenta la posible proliferación de bacterias en un pH neutro o alcalino.