



UNIVERSIDAD DE MATANZAS
Facultad de Ciencias Técnicas

Programa de Doctorado en
Tecnologías y Procesos Industriales

SECUENCIAS DE OPERACIONES TECNOLÓGICAS PARA LA OBTENCIÓN DE ÁCIDO HÚMICO, A PARTIR DE MATERIAS PRIMAS NACIONALES

TESIS PRESENTADA EN OPCIÓN AL GRADO CIENTÍFICO
DE DOCTOR EN CIENCIAS TÉCNICAS

M. Sc. Irina Pedroso Rodríguez

Matanzas, 2022



UNIVERSIDAD DE MATANZAS
Facultad de Ciencias Técnicas

Programa de Doctorado en
Tecnologías y Procesos Industriales

SECUENCIAS DE OPERACIONES TECNOLÓGICAS PARA LA OBTENCIÓN DE ÁCIDO HÚMICO, A PARTIR DE MATERIAS PRIMAS NACIONALES

TESIS PRESENTADA EN OPCIÓN AL GRADO CIENTÍFICO
DE DOCTOR EN CIENCIAS TÉCNICAS

Autor: M. Sc. Irina Pedroso Rodríguez

Tutores: Dr. C. Jesús Luis Orozco
Dr. C. Lourdes Yamen González Sáez

Matanzas, 2022

DEDICATORIA

A la memoria de mi abuelo Gollo

A mi mayor tesoro, Leidiel

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a todos los que me han apoyado en el desarrollo de esta investigación y han contribuido a que me convierta en mejor profesional y sobre todo en mejor persona.

- A mis padres, por todo, por el amor y el apoyo siempre, por estar siempre y por encauzarme por el camino correcto, este resultado es de ustedes también.
- A mis tutores: a Orozco por permitirme trabajar con él, por sus consejos y criterios tan certeros y oportunos y por su exigencia. A Lourdita por su paciencia, su apoyo y sus consejos. Más que un equipo de trabajo, ya somos amigos.
- A mi hermano por estar siempre para mí, y ser mi camaroncito duro y a Yailén, por ser parte de mi familia.
- A Alexis, por su amor, apoyo y preocupación, a pesar de la distancia, siempre ha estado presente.
- A mi hermana de siempre, Nieves Naylens, no hay distancia ni intereses que rompan nuestros lazos.
- A mi hermanita pequeña, Lizy, por ser motor impulsor para que llegara este momento, sin rendirse y apoyándome incondicionalmente en todo, por su alegría y transparencia, ya eres parte de mi familia.
- A Damaris por estar siempre para mí y para mi familia, y por ser una amiga extraordinariamente especial.
- A mi tía Tere por su cariño eterno.
- A mis amigos de siempre, Yoney, Ana Laura, Yaima, Ainel, Yamilé, Agustín, Cristina, Glennys, José, Dariel, Berkys, Naylen, Richard, Mayli, Javier, Mariela, Daymí, Ana Luisa y Liana, por los buenos y malos momentos que compartimos, por saber valorar la amistad.
- A Ida y Arsenio, por recibirme en su familia, y ser tan especiales.
- A todos mis colegas del departamento, un agradecimiento especial, a Milagros, a Edelys, a Jenifer y a Saúl por su apoyo.
- A mí siempre tutor, Félix Juan, por ser precursor de esta investigación y quien guió mis primeros pasos profesionales.
- A Leissy y Héctor Luis, por el apoyo en la investigación.
- A mis colegas del Consejo de Dirección de la FCT.
- Al claustro del programa de Formación Doctoral Tecnologías y Procesos Industriales, en especial al coordinador Dr. C. Ramón Quiza Sardiñas.
- A la dirección y al departamento técnico de la Empresa LABIOFAM, por el apoyo en la investigación.
- A todos los que en algún momento se han preocupado por el progreso de esta investigación, ¡Muchas gracias!

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD Y NOTA LEGAL

Yo, Irina Pedroso Rodríguez, declaro que soy el único autor de la siguiente tesis, titulada “Secuencias de operaciones tecnológicas para la obtención de ácido húmico, a partir de materias primas nacionales” y, en virtud de tal, cedo el derecho de copia de la misma a la Universidad de Matanzas, bajo la licencia *Creative Commons* de tipo *Reconocimiento No Comercial Sin Obra Derivada*, con lo cual se permite su copia y distribución por cualquier medio siempre que mantenga el reconocimiento de sus autores, no haga uso comercial de la obra y no realice ninguna modificación de ella.

Matanzas, 23 de septiembre de 2022.

Irina Pedroso Rodríguez

RESUMEN

El aumento de la población humana ha llevado a un cultivo intensivo sin reponer adecuadamente los nutrientes del suelo. Los fertilizantes químicos han sido reclamados como el contribuyente más importante para el aumento de la productividad agrícola, con el consiguiente aumento de los costos de producción. De ahí la necesidad de buscar alternativas de fertilizantes que mejoren la calidad del suelo y el desarrollo de las plantas. La presente investigación tiene como objetivo proponer secuencias de operaciones tecnológicas para la obtención de ácido húmico, a partir de materias primas nacionales. Se realiza una etapa experimental para determinar las condiciones óptimas de extracción de ácido húmico, según la metodología, las materias primas y las operaciones de separación en las etapas de extracción básica y ácida. Se proponen siete variantes de secuencias de operaciones tecnológicas para la obtención de ácido húmico, a partir de la cachaza y el estiércol de ganado vacuno, residuos de la industria agropecuaria nacional. El ácido húmico obtenido partir de la cachaza y el estiércol de ganado vacuno presenta contenidos de materia orgánica de 60,30 % y 60,71 % respectivamente; con presencia en su estructura de grupos carbonilos, hidroxilos y carboxilos, lo que corrobora la acidez de este producto. Todas las alternativas del caso base resultaron factibles. Para la cachaza la más factible es producir 1000 toneladas anuales con las operaciones de separación sedimentación-sedimentación y para el estiércol producir 700 toneladas anuales con centrifugación - centrifugación, con un costo por peso de 0,51 y 0,55, un Plazo de Recuperación de la Inversión de 2,65 y 2,50 años y una Tasa de Recuperación de la Inversión de 39 %, respectivamente.

Palabras claves: ácido húmico; extracción, cachaza, estiércol de ganado vacuno, operaciones tecnológicas.

ABSTRACT

The human population increase has taken to an intensive cultivation without restoring the nutrients of the floor appropriately. The chemical fertilizers have been claimed as the most important taxpayer for the increase of the agricultural productivity, with the rising increase of the production costs. Of there the necessity to look for alternative of fertilizers that improve the quality of the floor and the development of the plants. The present investigation has as objective to propose sequences of technological operations for the obtaining of humic acid, starting from national matter raw. The experimental stage determines the optimal conditions for the extraction of humic acid, according to the methodology, the raw materials and the separation operations in the basic and acid extraction stages. Propose seven variants of sequences of technological operations for the obtaining of humic acid, from filter cake and the manure of bovine livestock, wastes of the national agricultural industry. The humic acid produced from filter cake and the manure of bovine livestock presents contents of organic matter of 60,30 % and 60,71 % respectively; with presence in their structure of groups carbonyl, hydroxyl and carboxyl, what corroborates the acidity of this product. All the alternatives of the case base they were feasible. For the filter cake the most feasible is to produce 1000 annual tons with sedimentation-sedimentation separation operations and for the manure of bovine livestock to produce 700 annual tons with centrifugation - centrifugation, with a cost for weight of 0,51 and 0,55 a Term of Recuperation of the Inversion of 2,65 and 2,50 years and a Recovery of the Investment of 39 %, respectively.

Keywords: humic acid, extraction, filter cake, manure of bovine livestock, technology operations

SÍMBOLOS

AH: ácido húmico

AF: ácido fúlvico

H: humina

SH: sustancias húmicas

D: diámetro

H: altura

EB: extractante básico

EA: extractante ácido

MO: materia orgánica

% EMO_{AH} : porcentaje de extracción de materia orgánica en el ácido húmico

S/L: relación sólido líquido

t_{EB} : tiempo de extracción básica

t_{EA} : tiempo de extracción ácida

m_{MP} : masa de materia prima (g)

$m_{cachaza}$: cantidad de cachaza

$m_{estiércol}$: cantidad de estiércol de ganado vacuno

m_{EB} : cantidad de extractante básico

m_H : cantidad de humina

m_{EA} : cantidad de extractante ácido

m_H : cantidad de humina

m_{AH} : cantidad de ácido húmico

m_{AF} : cantidad de ácido fúlvico

$X_{(MO)MP}$: composición de materia orgánica en la materia prima

$X_{(MO)AH}$: composición de materia orgánica en el ácido húmico

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1. ESTADO DEL ARTE	4
1.1 Caracterización de las sustancias húmicas.....	4
1.1.1 Caracterización de los ácidos húmicos	7
1.1.2 Caracterización de los ácidos fúlvicos	8
1.1.3 Caracterización de la humina	9
1.1.4 Aplicaciones de las sustancias húmicas	10
1.2. Extracción de sustancias húmicas	12
1.2.1. Tipos de extractantes.....	13
1.2.2. Fuentes orgánicas	15
1.3. Métodos de separación de sistemas sólido-líquido.....	16
1.3.1. Filtración.....	17
1.3.2. Centrifugación	19
1.3.3. Sedimentación.....	19
1.3.4. Exprimido.....	20
1.4. Diseño de plantas químicas.....	21
1.5. Conclusiones del capítulo	24
CAPÍTULO 2. ETAPA EXPERIMENTAL PARA LA OBTENCIÓN DE ÁCIDO HÚMICO.....	25
2.1. Etapa 1: Selección de la metodología de extracción de sustancias húmicas	26
2.1.1. Condiciones experimentales para la extracción de ácido húmico	26

2.1.2. Diseño experimental para seleccionar la mejor combinación de extractantes	27
2.1.3. Resultados de esta etapa.....	29
2.2. Etapa 2: Selección de las materias primas adecuadas para la obtención de sustancias húmicas.....	30
2.2.1. Proceso de muestreo.....	31
2.2.2. Caracterización de las materias primas	31
2.2.3. Rendimiento de extracción del ácido húmico	33
2.2.4. Selección de las Materias Primas	35
2.3. Etapa 3: Determinación de las mejores condiciones operacionales de extracción de ácido húmico	36
2.3.1. Condiciones experimentales de las variables operacionales.....	36
2.3.2 Resultados de las condiciones operacionales para la cachaza.....	37
2.3.3. Resultados de las condiciones operacionales para el estiércol de ganado vacuno.....	39
2.4. Etapa 4: Determinación de las condiciones de almacenamiento de las materias primas.	42
2.4.1. Condiciones experimentales para el estudio de la etapa de almacenamiento de las materias primas.....	42
2.4.2. Resultados para las condiciones de almacenamiento de la cachaza	42
2.4.3. Resultados para las condiciones de almacenamiento del estiércol de ganado vacuno.....	45
2.5. Selección del proceso de pretratamiento de las materias primas	49
2.5.1. Condiciones experimentales	49

2.5.2. Resultados del rendimiento de extracción de ácido húmico para los diferentes pretratamientos de la cachaza y el estiércol de ganado vacuno	49
2.6. Determinación de las operaciones de separación y fraccionamiento de las sustancias húmicas.....	50
2.6.1. Condiciones experimentales para la extracción del ácido húmico	51
2.6.2. Resultados de las etapas de separación para la cachaza	52
2.6.3. Resultados para el estiércol de ganado vacuno	53
2.7. Caracterización del producto final.....	53
2.7.1. Métodos empleados para la caracterización.....	53
2.7.2. Resultados de la caracterización del ácido húmico, a partir de la cachaza y del estiércol de ganado vacuno	54
2.8. Conclusiones del capítulo	57
Capítulo 3. ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS DE PRODUCCIÓN DE ÁCIDO HÚMICO, A PARTIR DE CACHAZA Y ESTIÉRCOL DE GANADO VACUNO	58
3.1. Definición y evaluación del problema primitivo	59
3.2. Etapa de creación del proceso	59
3.2.1. Base de datos preliminar.....	59
3.2.2. Disponibilidad de las materias primas.....	61
3.2.3. Resultados de la etapa experimental.....	62
3.3. Desarrollo del caso.....	62
3.3.1. Definición del tipo de proceso	62
3.3.2. Definición del estado químico	63
3.3.3. Operaciones del proceso	63
3.4. Diseño de los equipos involucrados en el proceso	66

3.4.1. Diseño de los tanques de almacenamiento	66
3.4.2. Diseño del tanque de mezclado con agitación	68
3.4.3. Diseño del tanque de extracción ácida	71
3.4.4. Diseño de los equipos de separación y fraccionamiento de las sustancias húmicas.....	71
3.5. Macrolocalización de las plantas de producción de ácido húmico	76
3.6. Valoración económica de las alternativas de los casos base Ay B.....	78
3.7. Valoración económica de variantes de las alternativas caso base	82
3.7.1. Valoración económica de las alternativas A1, A2 y A3	82
3.7.2. Valoración económica de las alternativas B1 y B2	85
3.8. Conclusiones del capítulo	87
CONCLUSIONES.....	89
RECOMENDACIONES	91
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92
ANEXOS.....	

INTRODUCCIÓN

El aumento de la población humana ha llevado a un cultivo intensivo sin reponer adecuadamente los nutrientes del suelo. Ello ha provocado la disminución de los rendimientos de los cultivos y el agotamiento de la base de recursos (García, 2021; Gómez, 2019; Raposo *et al.*, 2016; Veobides-Amador *et al.*, 2018).

Los fertilizantes químicos han sido reclamados como el contribuyente más importante para el aumento de la productividad agrícola mundial en las últimas décadas, debido a que pueden mejorar los rendimientos de los cultivos y el pH del suelo, contenido total y disponibilidad de nutrientes, pero los efectos negativos del uso intensivo de los mismos en el suelo y en el medio ambiente limitan su aplicación en sistemas agrícolas sostenibles (Martínez *et al.*, 2021). Esto amenaza la seguridad alimentaria futura y aumenta los costos de producción para los agricultores. De ahí la necesidad de buscar formas alternativas de fertilizantes que mejoren la calidad del suelo y el desarrollo de las plantas.

Entre las alternativas se encuentra el uso de fertilizantes minerales que es el más efectivo y la forma más conveniente de mejorar la fertilidad del suelo, pero es muy costosa, sin embargo, actualmente hay una necesidad de sostenibilidad en la agricultura en la que se mantiene la fertilidad del suelo mediante el uso de recursos renovables económicos que están fácilmente disponibles. Los fertilizantes orgánicos, incluyendo estiércol de ganado, estiércol de pollo, el estiércol de ovejas y los biofertilizantes pueden usarse para la producción de cultivos como sustituto de fertilizantes químicos (Baghdadi *et al.*, 2018). En comparación con los fertilizantes químicos, los fertilizantes orgánicos mejoran la fertilidad y productividad del suelo, así como el rendimiento de los cultivos mediante la mejora de las propiedades físicas, químicas y microbiológicas del suelo, sin dejar ningún efecto residual en el suelo y son mucho más económicos (Méndez, 2019, Baghdadi *et al.*, 2018, Bhatt *et al.*, 2018). También aumenta la acumulación de carbono orgánico en el suelo, que a su vez induce cambios en la comunidad microbiana, estructura y estimula la biomasa microbiana (Villagrán *et al.*, 2020).

Cuba ya ha acumulado experiencias significativas en la transición hacia un desarrollo agrícola más sostenible (Funes y Vázquez, 2016; Veobides-Amador *et al.*, 2018). Sin duda, hoy la producción agrícola en Cuba es más autosuficiente y preocupada, como nunca antes,

con la protección del medio ambiente. Aunque la protección del medio ambiente sigue siendo baja en la práctica, el apoyo legal para preservar el medio ambiente es muy útil para las estrategias sostenibles agrícolas actuales y futuras.

En los organopónicos urbanos de la provincia de Matanzas se utiliza como abono el estiércol de ganado vacuno, pero este presenta agentes patógenos, que afectan la salud humana. Es por ello, que la producción de fertilizantes orgánicos se ha convertido en una necesidad, dada la no existencia de otros y por el hecho de producir alimentos ecológicos, es decir, libres de productos químicos. Dentro de estos fertilizantes se encuentran las sustancias húmicas.

Las sustancias húmicas se extraen de diferentes fuentes orgánicas (Méndez, 2019) y han atribuido grandes ventajas en la agricultura como fertilizantes: contribuyen al mejoramiento de los suelos, ayudan a la germinación de las semillas e incrementan la energía para plantas y suelos. Además, son empleadas en la medicina y en el campo industrial (Mosa *et al.*, 2020; Veobides-Amador *et al.*, 2018; Zambrano, 2021).

El ácido húmico es el componente activo de varios materiales orgánicos, por lo que estudios sobre purificación y usos del mismo se reportan a nivel internacional (Olk *et al.*, 2019; Raposo *et al.*, 2016; Saito y Seckler, 2014; B. Scaglia *et al.*, 2016; Sun *et al.*, 2020; Villagrán *et al.*, 2020), y se buscan las vías y métodos más adecuados en la extracción del mismo, para su uso como fertilizante. Existen, además, aplicaciones terapéuticas desarrolladas por en el tratamiento del virus de inmunodeficiencia adquirida SIDA y de diferentes tipos de metástasis de cáncer.

En el mundo se han utilizado diferentes materias primas para la obtención de ácido húmico, como son la turba (Fuentes *et al.*, 2018; Hu *et al.*, 2022; Saito y Seckler, 2014) y la leonardita (Hayes y Swift, 2020), fuentes de escasa disponibilidad en Cuba. A pesar de los conocimientos y resultados encontrados en consulta de la bibliografía especializada, en Cuba no se perciben antecedentes de producción de ácido húmico a partir de materias primas nacionales.

Por lo que se plantea como problema científico:

¿Será posible obtener ácido húmico a partir de materias primas cubanas que garanticen producciones técnica y económicamente factibles?

Para dar solución a dicho problema se plantea como hipótesis de la investigación:

- El estudio del proceso de extracción de ácido húmico a partir de materias primas nacionales, permitirá proponer secuencias de operaciones tecnológicas, técnicas y económicamente factibles para su producción

Para dar solución a la hipótesis planteada anteriormente se traza el objetivo general de la investigación:

- Proponer secuencias de operaciones tecnológicas para la obtención de ácido húmico, a partir de materias primas nacionales.

Para dar cumplimiento al objetivo general se trazan los siguientes objetivos específicos:

1. Definir la metodología de extracción de ácido húmico más factible
2. Definir las materias primas adecuadas para la extracción de ácido húmico
3. Determinar las condiciones óptimas de operación en la extracción de ácido húmico y de pretratamiento de las materias primas
4. Caracterizar el ácido húmico obtenido a partir de materias primas disponibles
5. Evaluar técnica y económicamente las alternativas propuestas para la obtención de ácido húmico

La **novedad científica** del tema está dada en:

- Propuesta y validación de alternativas de secuencias tecnológicas para la obtención de ácido húmico a partir de materias primas cubanas.

Aporte Económico:

- Producción de uno o varios productos naturales de alto valor que pueden ser comercializados como materia prima para la producción de fertilizantes granulados y orgánicos.

Impacto Ambiental

- Aprovechamiento y reutilización de residuos agropecuarios para la obtención de un producto de nuevo valor.

Impacto social:

- El incremento de empleos en zonas rurales, por las características de las materias primas utilizadas.

CAPÍTULO 1. ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se abordan temas como el origen y las características de las sustancias húmicas, los procesos de extracción de las sustancias húmicas y las bases para el diseño de una planta química, mediante un amplio estudio de la bibliografía especializada.

1.1 Caracterización de las sustancias húmicas

Fue en Roma en 1961 donde por primera vez se aplicó el término "humus" para nombrar al suelo en su totalidad, al pasar de los años autores como Stevenson (1982); Piccolo *et al.* (1996); Wershaw (1986); Aiken (1985) citados en Hutta *et al.* (2011) lo atribuyen a la suma de todos los compuestos orgánicos en el suelo, organismos vivos en la biomasa y no descompuestos, o desechos orgánicos parcialmente descompuestos de origen vegetal o animal.

Las sustancias húmicas (SH) son los intermediarios químicos entre las plantas y los fósiles; son el último producto de descomposición natural aeróbica y de toda la materia viviente en presencia de agua (Baca, 2015). Por otro lado, Benites *et al.* (2003) y Raposo *et al.* (2016) definen a las sustancias húmicas como una serie de polímeros amorfos de color amarillo marrón a negro, de masa molecular relativamente alta. Para Roba *et al.* (2011) y Weber (2020) son moléculas con masa molecular en el rango de varios cientos a decenas de miles de Daltons, y formadas por reacciones de síntesis secundaria, biótica y abióticas, llamadas humificación (Mohinuzzaman *et al.*, 2020; Roba *et al.*, 2011; Shen *et al.*, 2016). Los análisis cromatográficos, de espectroscopia infrarroja y densidad óptica según varios autores (Chianese *et al.*, 2020; Constantino *et al.*, 2021; De Souza y Roca, 2018; Fuentes *et al.*, 2018), demuestran que las sustancias húmicas se componen por estructuras complejas, aromáticas, polinucleares, con grupos funcionales carboxilos, hidroxilos, fenólicos, alcohólicos y metóxilos.

El planteamiento de Roba *et al.* (2011) acerca de que las sustancias húmicas representan aproximadamente el 80 % del carbono orgánico total en medios terrestres y 60 % de los disueltos en aguas naturales, es similar al de Shen *et al.* (2016), que plantea que estas

representan entre un 60 y un 70 % del carbono orgánico total (COT) en suelos y entre el 60 y el 90 % de carbono en aguas naturales.

Algunos autores relacionados con el tema (Raposo *et al.*, 2016; Stevenson y Goh, 1971; Valenzuela y Cervantes, 2021; Veobides-Amador *et al.*, 2018; Weber, 2020) plantean que los principales componentes de la materia orgánica son las sustancias húmicas (SH), que se fraccionan en ácidos húmicos (AH), ácidos fúlvicos (AF) y humina (H) según su solubilidad, representada en la figura 1.1.

- Ácidos húmicos (AH): representa la fracción que es insoluble en agua, en condiciones ácidas (pH <2), pero es soluble a valores de pH más superiores
- Ácidos fúlvicos (AF): son solubles en agua bajo todas las condiciones de pH
- Humina (H): es insoluble en agua a cualquier valor de pH

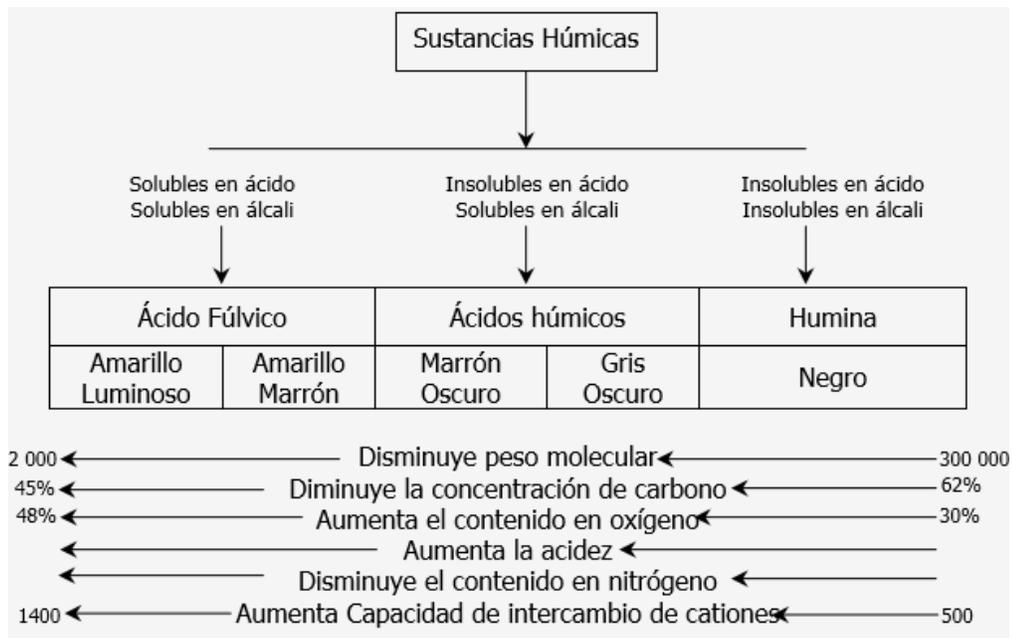


Figura 1.1. Fraccionamiento y propiedades de las sustancias húmicas (Weber, 2020)

En cuanto a la composición elemental especialmente de los ácidos húmicos y fúlvicos, los estudios realizados muestran que están constituidos por un porcentaje de carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O), nitrógeno (N), azufre (S) y fósforo (P), los cuales están presentes independientemente de la fuente orgánica (Gomes de Melo *et al.*, 2016; Helal *et al.*, 2011; Jindo *et al.*, 2020).

Varios estudios muestran la composición elemental de los ácidos húmicos y fúlvicos extraídos del suelo (tabla 1.1), donde se pone de manifiesto que los ácidos fúlvicos contienen mayor proporción de oxígeno y azufre, y menor de carbono, hidrógeno y nitrógeno que los ácidos húmicos. Estos intervalos coinciden con estudios realizados por diferentes autores (Michalska *et al.*, 2022; Villagrán-Manilla *et al.*, 2020).

Es necesario completar el análisis elemental con la información que proporcionan las relaciones atómicas H/C y O/C sobre la estructura. Se observa como los ácidos fúlvicos presentan mayores contenidos de oxígeno y menores de carbono. De esa manera las relaciones O/C que hace referencia al contenido de grupos funcionales oxigenados, para los ácidos húmicos presentan un valor aproximado de 0,5, mientras que para ácidos fúlvicos este valor se centra en 0,7 y la relación H/C que indica el carácter alifático, para los ácidos húmicos es de 1,0 y para los ácidos fúlvicos toma un valor de 1,4 (Helal *et al.*, 2011).

Tabla 1.1. Intervalos usuales de la composición elemental de las sustancias húmicas

Elementos	Ácido húmico (%)	Ácido fúlvico (%)
Carbono	53,80 – 58,70	40,70 – 50,60
Oxígeno	32,80 – 38,30	39,70 – 49,80
Hidrógeno	3,20 – 6,20	3,80 – 7,00
Nitrógeno	0,8 – 4,30	0,90 – 3,30
Azufre	0,10 – 1,50	0,10 – 3,60
Fósforo	0,10 – 1,00	0,10 – 1,00

Fuente: (Vargas, 2016)

Según la distribución de grupos funcionales oxigenados (tabla 1.2) los ácidos fúlvicos contienen un mayor número de grupos funcionales de carácter ácido que los ácidos húmicos (Vargas, 2016), particularmente carboxilos y fenoles. Por lo tanto, la acidez total de los ácidos fúlvicos es considerablemente mayor que para los ácidos húmicos.

Tabla 1.2. Distribución de grupos funcionales oxigenados en sustancias húmicas

Elementos	Ácido húmico (meq/100 g)	Ácido fúlvico (meq/100 g)
Acidez total	560 - 890	640 - 1420
COOH ⁻	150 - 570	520 - 1120
OH ⁻ acídicos	210 - 570	30 - 570
OH ⁻ alcohólicos y débilmente ácidos	20 - 490	260 - 950
-C=O cetónicos y quinónicos	30 - 140	120 - 420
-OCH ₃	30 - 80	30 - 120

Gong *et al.* (2017) y Weber (2020) plantean que el contenido de carbono y oxígeno, la acidez y el grado de polimerización cambian sistemáticamente a medida que aumenta la masa molecular. Los ácidos fúlvicos de baja masa molecular tienen menores contenidos de carbono que los ácidos húmicos de elevada masa molecular, pero mayor oxígeno debido a los grupos funcionales conocidos (COOH, OH, C = O), mientras que los ácidos húmicos la mayor parte del oxígeno se encuentra formando parte del núcleo o estructura central. La mayoría de los autores clasifican las SH como sustancias húmicas propias (ácido húmico y ácido fúlvico) y la humina, de acuerdo con su solubilidad.

1.1.1 Caracterización de los ácidos húmicos

Según Schwartz *et al.* (1968), el término "ácido húmico" se ha aplicado ampliamente a sólidos ácidos obtenidos de la descomposición de las plantas. Los ácidos húmicos (AH) son componentes principales del humus y están presentes en minerales, suelo, sedimentos, residuos animales y vegetales, agua (Jana *et al.*, 2016). Por otro lado, Susic (2016) define que el término ácidos húmicos se usa para los ácidos, poliméricos, alcalinos solubles que se encuentra en suelos, plantas, pastos marinos, hongos, sedimentos y aguas terrestres y marinas.

El ácido húmico es el principal componente extraíble de residuos orgánicos de las sustancias húmicas, es de color marrón oscuro a negro y comprende más del 80% de las sustancias húmicas en las aguas residuales y lodos (Gong *et al.*, 2017).

Están formados por una mezcla heterogénea de compuestos, es decir, no tienen una fórmula estructural única (Stevenson y Goh, 1971). La estructura hipotética para el ácido húmico contiene grupos fenólicos -OH libre y unido, estructuras de quinonas, nitrógeno y oxígeno como unidades puente y grupos -COOH colocados de manera variada en anillos aromáticos. Están compuestos principalmente de grupos carboxílicos e hidroxilos como sus grupos funcionales (Mohinuzzaman *et al.*, 2020; Oyedeko *et al.*, 2020; Stevenson y Goh, 1971; Zhang *et al.*, 2017).

Los ácidos húmicos son sustancias extraídas por disolventes (NaOH_(ac), KOH_(ac), NH₄OH_(ac), Na₂HCO_{3(ac)}, Na₄P₂O_{7(ac)}, NaF_(ac), oxalato sódico, urea, y otros); así mismo, son insolubles en alcohol y ácidos minerales (Weber, 2020).

Los ácidos húmicos son duros, quebradizos, sólidos, esencialmente insolubles en agua en condiciones ácidas (Asing *et al.*, 2009; Schwartz *et al.*, 1968), pero pueden volverse solubles a un pH mayor, es por ello que para su aplicación se disuelven a diferentes concentraciones, en soluciones alcalinas.

Tienen mayor masa molecular que los ácidos fúlvicos según Roba *et al.* (2011) que varía de 7×10^2 a 2×10^6 Daltons. Por otro lado, Asing *et al.* (2009) y Gomes de Melo *et al.* (2016) plantean que son conocidas como la fracción de mayor masa molecular de 1500 a 5000 Daltons y de 50 000 a 500 000 Daltons en arroyos y sedimentos, respectivamente.

1.1.2 Caracterización de los ácidos fúlvicos

En la caracterización de los ácidos fúlvicos, Huculak-Maczka (2020) distingue ácidos hidrocarboxílicos, grupos metoxilos, carboxilos e hidroxilos fenólicos que son, igualmente, característicos para los ácidos húmicos, poseen una naturaleza aromática más débil, predominando en su estructura los grupos laterales.

Los AF contienen oxígeno dos veces mayor que los ácidos húmicos, contienen más grupos carboxílicos (COOH) e hidroxilos (-OH), lo que genera un compuesto químicamente más reactivo, con doble capacidad de intercambio aniónico y catiónico (CIC) (que el AH, además la alta CIC es producido por los grupos carboxilos. Los ácidos fúlvicos están compuestos por ácidos carboxílicos y fenólicos que les confieren características de mayor reactividad, tienen mayor solubilidad y movilidad por su menor masa molecular, poseen menor agregación y estabilidad (Tsuda *et al.*, 2014).

Se tienen diversos criterios relacionados con la masa molecular de los ácidos fúlvicos (AF) según Roba *et al.* (2011) son moléculas de baja masa molecular (relativamente) inferior a 1×10^4 Daltons, y en estudios de Raposo *et al.* (2016), se encuentran entre 600 a 1000 Daltons en corrientes y entre 1000 a 5000 Daltons en suelos.

Son moléculas extremadamente complejas, solubles en agua, alcohol, álcali y ácidos minerales ya sea a pH ácido o básico. Según Verrillo *et al.* (2021) presentan un color predominante amarillo - amarillo pardusco y gran capacidad de intercambio catiónico alrededor de 700 meq/100 g.

1.1.3 Caracterización de la humina

A partir de estudios realizados (Tadini *et al.*, 2015), definen a la humina como la porción extraída que permanece insoluble en soluciones acuosas a todos los niveles de pH, y se trata operacionalmente como el residuo de materia orgánica restante, con reducida capacidad de reacción, por lo general esta fracción es de color negro.

La humina presenta baja acidez en comparación con los AF y AH, y junto con la fuerte asociación a los minerales, provoca insolubilidad en el medio alcalino acuoso. Además, la estructura química y propiedades de la fracción de la humina parecen ser similares a la de los AH y representa entre el 20 y 50 % de las SH (Tadini *et al.*, 2015).

La humina consiste en una variedad de materiales, como fracción de ácidos húmicos unida a materiales minerales (arcilla) que no se separaron en el proceso de extracción. Son materiales húmicos con alto contenido de carbono (más del 60 %) (Tadini *et al.*, 2015).

Estas sustancias tienen los mayores tamaños moleculares, su masa molecular está alrededor de 300 000 Dalton según Raposo *et al.* (2016).

El contenido de oxígeno de esta sustancia es el más bajo, en el rango de 32 a 34 %, mientras que el contenido de nitrógeno es el más alto, alrededor del 4 % (Islam *et al.*, 2005) y según Stevenson y Goh (1971) su composición química es de C (55,9 %), H (5,9 %), N (0,9 %), O (37,3 %). Es la fracción más estable y no extraíble con disolventes clásicos.

La autora considera que los principales métodos para la caracterización de las sustancias húmicas son espectroscopia infrarroja (IR), espectroscopia ultravioleta visible (UV-vis), contenido de carbono orgánico, análisis elemental de carbono, hidrógeno, oxígeno y

nitrógeno, y para el caso de los ácidos húmico y fúlvico la composición de micronutrientes (Ca, Mg, K, P, Na)

1.1.4 Aplicaciones de las sustancias húmicas

La aplicación de las sustancias húmicas ha sido tema de interés de muchos investigadores a las cuales le han atribuido grandes ventajas en la agricultura, como fertilizantes tanto para el suelo como para las plantas, entre las que se encuentran (Veobides-Amador *et al.*, 2018; Verrillo *et al.*, 2021; Weber, 2020):

- Mejora la absorción de nutrientes, especialmente fósforo, azufre y nitrógeno
- Reduce la necesidad de fertilización nitrogenada
- Elimina toxinas de suelos y animales
- Estimula la actividad biológica del suelo
- Solubiliza minerales
- Mejora la estructura del suelo especialmente en suelos con baja materia orgánica (Asing *et al.*, 2009; Huelva *et al.*, 2013) donde los agricultores aplican abono orgánico en campos agrícolas para nutrir el suelo y mantener la productividad (Jana *et al.*, 2016; Susic, 2016)
- Actúa como un depósito de nitrógeno, fósforo, azufre y zinc
- Mejora la capacidad de retención de agua para una mejor resistencia a la sequía y reducir el uso del agua (Fuentes *et al.*, 2018; Vargas, 2016)
- Liberación biológica de nutrientes de minerales insolubles
- Crecimiento de la raíz
- Adsorción de nutrientes de la masa de raíz más grande
- Respiración
- Fotosíntesis
- Biodisponibilidad mineral y estabilización
- Estabilización de nitrógeno y eficiencia de fertilizantes
- Resistencia a enfermedades
- Fuerza, vigorosidad y crecimiento de la raíz de la planta
- Incrementa la energía para plantas y suelos

- Incrementa la velocidad de germinación de las semillas
- Incrementa los rendimientos y la calidad de las plantas
- Agrega oxígeno al suelo
- Reduce el uso de herbicidas entre un 25 y 50 %

Otras aplicaciones de las sustancias húmicas son:

- Ambiental: la principal tarea de las sustancias húmicas en el medio ambiente es eliminar metales tóxicos, antropogénicos, productos químicos orgánicos y otros contaminantes del agua. Se han desarrollado filtros a base de sustancias húmicas para la purificación de aguas residuales. Además, gracias a su capacidad de adsorber contaminantes orgánicos del medio ambiente, se descubrió que las sustancias húmicas eran útiles para eliminar esos contaminantes del agua, lodos de tierra y aguas residuales (Constantino *et al.*, 2021; Cornelissen *et al.*, 2008).
- Animales: el ácido húmico tiene muchos efectos beneficiosos como antibacteriano, antiviral y antiinflamatorio en animales, mejora el sistema inmune, manejo del estrés y reducir el olor en las heces. También tiene un efecto positivo sobre el funcionamiento del hígado. Reduce la mortalidad y aumenta el crecimiento en aves de corral. También se utiliza como antioxidantes para preservar las aves de corral y alimentos avícolas (Jana *et al.*, 2016).
- Cerámica: las sustancias húmicas eran empleadas principalmente como aditivos para mejorar la resistencia mecánica de la cerámica sin procesar y las propiedades de fundición de la cerámica. También los ácidos húmicos han sido utilizados tradicionalmente como agentes dispersantes y licuantes en cerámica (De Souza y Roca, 2018).
- Industria del plástico: los materiales húmicos han encontrado aplicación en la producción de plásticos, especialmente como colorantes para plásticos de nylon 6 o PVC, endurecedores de espumas de poliuretano o como plastificantes ingredientes para PVC.
- Pinturas y recubrimientos industriales: los ácidos húmicos pueden ser utilizados como agentes de color negro, pigmentos especiales y aditivos de control reológico en pinturas con base de aceite, recubrimientos industriales, barnices y lacas. Pueden ser especialmente usados en el coloreado de madera, cuero y alfombras. Además, las

sustancias húmicas se emplean para colorear baldosas de arcilla y entre muchos otros usos también se aplicaron en la preparación de loza de barro

- Áreas farmacéutica y cosmética: los ácidos húmicos pueden usarse en protector solar, antienviejecimiento y cuidado de la piel debido a su capacidad de absorción en los rayos ultravioleta en el rango visible. Tienen gran potencial como componente de lápices labiales para prevenir la reactivación del virus del herpes simple con luz ultravioleta. Además, debido a la actividad antiviral de las sustancias húmicas se emplea en cosméticos como un componente de máscaras faciales, que se utilizan para la prevención en la reactivación de virus después de un tratamiento químico facial (Gomes de Melo *et al.*, 2016).
- Medicina: la actividad antiviral del ácido húmico se ha mostrado en diversos virus, como el citomegalovirus (CMV), virus de vacunas y virus de inmunodeficiencia humana de tipo 1 (VIH-1) y tipo 2 (VIH-2). Asimismo, se reconocen como inhibidores de la mutagénesis, que poseen una actividad antimutagénica que bloquea el proceso de mutagénesis dentro de la célula. También tienen un efecto positivo en la curación de heridas y la terapia contra el cáncer (Gomes de Melo *et al.*, 2016). Los ácidos fúlvicos son utilizados para el tratamiento de muchos padecimientos debido a sus propiedades como antiinflamatorio, anticoagulante y por lo tanto promotores de la circulación sanguínea. Son útiles en el tratamiento de úlceras del tracto digestivo, del colon y dermaticas. Mejoran el sistema inmune, regulan el sistema endocrino, previenen cánceres y disminuyen problemas de artritis y reumatismo.

La autora considera que a pesar que las sustancias húmicas se aplican en diversas industrias, en la agricultura ha aportado efectos significativos. Por ello, en este trabajo, se selecciona como posterior uso de los productos obtenidos la agricultura.

1.2. Extracción de sustancias húmicas

Para la obtención de sustancias húmicas, varios autores (Susic, 2016; Weber, 2020) consideran que es de vital importancia, la técnica de extracción aplicada y la fuente de materia orgánica utilizada.

Existen una gran variedad de técnicas de separación de sustancias húmicas, que dependen del extractante y material a extraer. Susic (2016) y Weber (2020) clasifican los extractantes de sustancias húmicas en tres grupos:

- Extractantes Fuertes
- Extractantes Medios
- Extractantes Suaves

1.2.1. Tipos de extractantes

También se utiliza el ácido fórmico como extractante, aunque algunas bibliografías definen a los extractantes suaves y medios en un solo grupo, sin embargo, en este trabajo se hará distinción entre ellos (tabla 1.3).

El empleo de agentes fuertes constituye el procedimiento más utilizado para la extracción de sustancias húmicas debido al alto porcentaje de extracción. Entre ellos se destaca el hidróxido de sodio (Jana *et al.*, 2016; Raposo *et al.*, 2016) y el KOH (Lukyanov *et al.*, 2016).

La Asociación Internacional de Sustancias Húmicas recomienda el empleo de hidróxido de sodio para la extracción de sustancias húmicas de sedimentos o sólidos orgánicos. Estudios realizados por Asing *et al.* (2009) demuestran que el empleo de hidróxido de sodio es más eficiente que el hidróxido de potasio. Sin embargo, Pedroso *et al.* (2022) reporta que la cantidad de sustancias húmicas que se extrae de tres materias primas diferentes es prácticamente el mismo al utilizar estos extractantes indistintamente.

Por otro lado, el empleo de extractantes fuertes presenta diversos inconvenientes como son la disolución de diversos materiales, tales como la sílice del material mineral y los componentes estructurales y protoplasmáticos de los tejidos orgánicos frescos, lo que contamina la fracción que se encuentra en solución acuosa. Además, pueden provocar cambios químicos entre aminoácidos y aldehídos. Diversos autores proponen el empleo de atmósferas inertes o de $N_{2(g)}$ con el objetivo de minimizar los cambios debidos a procesos de autooxidación, que puede producirse al contacto con el $O_{2(g)}$ del aire (Gong *et al.*, 2017).

Tabla 1.3. Extractantes utilizados para la separación de sustancias húmicas.

Extractante		Fundamentos	Referencias
Fuertes	NaOH	Es el procedimiento más utilizado para la extracción de sustancias húmicas de tipo comercial, por su alto porcentaje de extracción (80 %).	(Hayes y Swift, 2020; Jindo <i>et al.</i> , 2020; Kulikowska <i>et al.</i> , 2015; Olk <i>et al.</i> , 2019; Pedroso <i>et al.</i> , 2021; Pedroso <i>et al.</i> , 2022; Raposo <i>et al.</i> , 2016; Sun <i>et al.</i> , 2020)
	KOH		(Lukyanov <i>et al.</i> , 2016; Fuentes <i>et al.</i> , 2016; Saito <i>et al.</i> , 2014)
Medios	Na ₄ P ₂ O ₇ , EDTA	Estos extractantes producen mínimas alteraciones en la materia orgánica. En algunos casos se emplean junto a productos alcalinos para aumentar su efectividad.	Asing <i>et al.</i> (2009)
Suaves	(EDTA, acetilcetona, cupferrón y disolventes orgánicos de varios tipos como el tetrahidrofurano)	Una manera de aumentar la efectividad es la mezcla de estos reactivos con otros productos, como la urea a altas concentraciones. Obviamente, aunque las alteraciones que se producen en la materia orgánica extraída son menores, la efectividad que muestran estos productos es mucho menor.	Weber (2020)
Ácido Fórmico (HCOOH)		Se obtiene desde un 55 % de extracción de materia orgánica en suelos minerales, hasta un 80 % en compost. La extracción con ácido fórmico es la más eficiente para donde la mayoría de las sustancias orgánicas están parcialmente humificadas.	Weber (2020)

Estas sustancias producen mínimas alteraciones en la materia orgánica. Algunos de estos ejemplos son el pirofosfato de sodio ($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$), el oxalato amónico y otras sales neutras. El $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$, es uno de los más empleados, con una efectividad extractiva de un 30 %, aunque es común que se emplee junto a productos alcalinos para aumentar su efectividad (Asing *et al.*, 2009; Fuentes *et al.*, 2018). Investigaciones realizadas por Xu *et al.* (2017) muestran que la extracción con la mezcla 0,1N NaOH/ $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ es la más efectiva en ciertos tipos de turbas.

Los extractantes suaves se utilizan como alternativa a la agresividad de los extractantes alcalinos. Algunos de los más utilizados son el ácido etildiaminotetraacético (EDTA), acetilcetona, cupferrón y varios disolventes orgánicos. Una manera de aumentar la efectividad es la mezcla de estos reactivos con otros productos, como la urea a altas concentraciones. Aunque las alteraciones que se producen en la materia orgánica extraída son menores, la efectividad que muestran estos productos es mucho menor (Weber, 2020)

Otra de las sustancias empleadas es el ácido fórmico (HCOOH), con la cual se obtiene desde un 55 % de extracción de materia orgánica en suelos minerales, hasta un 80 % en compost. La extracción con ácido fórmico es la más eficiente para aquellos materiales donde la mayoría de las sustancias orgánicas están parcialmente humificadas (Weber, 2020).

Para el fraccionamiento de las sustancias húmicas (ácidos húmicos y fúlvicos) es necesario una etapa de acidificación hasta valores de pH entre 1 y 2. Los extractantes ácidos más utilizados son el ácido clorhídrico (Fuentes *et al.*, 2018; Jana *et al.*, 2016; Lukyanov *et al.*, 2016) y el ácido sulfúrico (Saito y Seckler, 2014; Tsuda *et al.*, 2014).

La autora reconoce a partir de la bibliografía consultada y teniendo en cuenta la coincidencia de criterios de varios autores que los extractantes básicos más recomendados son el $\text{NaOH}_{(\text{ac})}$ y el $\text{KOH}_{(\text{ac})}$ y como extractantes ácidos el $\text{HCl}_{(\text{ac})}$ y el $\text{H}_2\text{SO}_{4(\text{ac})}$.

1.2.2. Fuentes orgánicas

Existen varias fuentes orgánicas de las que se pueden extraer sustancias húmicas y en especial los ácidos húmicos, dentro de las que se encuentran:

- Humus de lombriz (B. Scaglia *et al.*, 2016)

- Estiércol de ganado (Ghouas *et al.*, 2012; B. Scaglia *et al.*, 2016; Tortosa Muñoz, 2011)
- Residuos de jardinería (Montoneri *et al.*, 2008).
- Lodos de plantas de tratamientos de agua (Tortosa Muñoz, 2011; Yang *et al.*, 2016).
- Compost (Asing *et al.*, 2009; B. Scaglia *et al.*, 2016)
- Turba (Fuentes *et al.*, 2018; Hu *et al.*, 2022; Saito y Seckler, 2014).
- Hoja de piña (Ahmad *et al.*, 2013)
- Torta de los filtros de la industria azucarera o cachaza (Galba *et al.*, 2010).
- Leonardita (Hayes y Swift, 2020).
- Sistemas acuáticos (Gerke, 2021; Gong *et al.*, 2017; Hu *et al.*, 2022; Huculak-Maczka, 2020).

Por la disponibilidad en el territorio, se seleccionan en esta investigación, el humus de lombriz, el compost, el estiércol de ganado vacuno y la cachaza, estos dos últimos residuos agropecuarios.

1.3. Métodos de separación de sistemas sólido-líquido

En la tecnología química se encuentran ampliamente difundidas las operaciones relacionadas con las separaciones mecánicas de sistemas sólido-líquido (Kasatkin, 1981).

Las técnicas están basadas en las diferencias físicas entre las partículas, tales como tamaño, forma o densidad. De forma general son aplicables a la separación de sólidos de gases, de gotas líquidas de gases, sólidos de sólidos y sólidos de líquidos (McCabe *et al.*, 1991).

En la figura 1.2 se muestran las principales tecnologías empleadas para la separación en sistemas sólido-líquido, así como la fuerza impulsora utilizada.

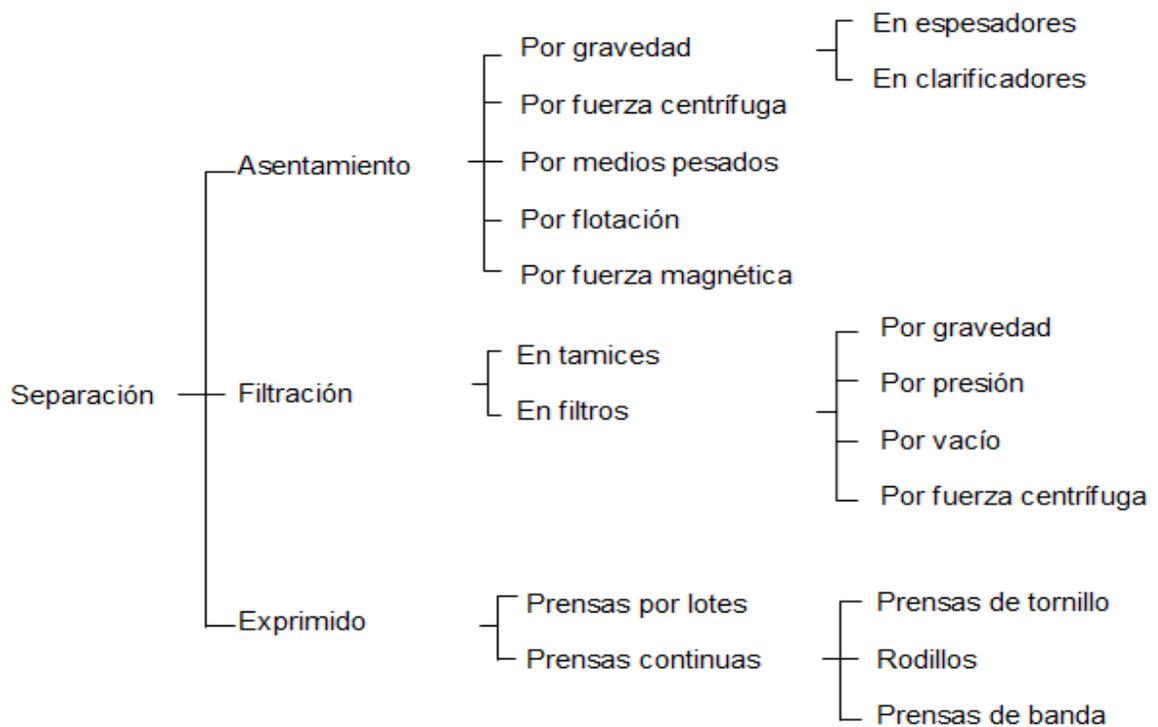


Figura 1.2: Tecnologías para la separación de sistemas heterogéneos sólido-líquido (Perry y Green, 2008; Walas, 1990).

1.3.1. Filtración

La filtración es la separación de una mezcla de sólidos y fluidos que implica el paso de gran parte del fluido a través de un medio poroso, el cual retiene la mayor parte de las partículas sólidas de la mezcla (Martín *et al.*, 2011; McCabe *et al.*, 1991; Perry y Green, 2008; Rosabal y Valle, 2006). Los filtros se pueden clasificar de acuerdo con los criterios que se describen a continuación:

- Ciclo operacional: pueden ser intermitentes o continuos (Perry y Green, 2008; Rosabal y Valle, 2006).
- Por la función: el objetivo de la operación de filtración puede ser la obtención de sólidos secos, líquidos clarificados o ambos casos (Perry y Green, 2008).
- Fuerza impulsora: la separación de los sólidos contenidos en un fluido se lleva a cabo mediante una fuerza impulsora como se indica en la figura 1.2, se clasifican en: filtros por gravedad, filtros a presión (o vacío) y filtros centrífugos.

- Medio filtrante: el medio filtrante es la barrera que permite el paso del líquido mientras retiene la mayor parte de los sólidos. De acuerdo con Perry y Green (2008) la selección del mismo se realiza según los aspectos siguientes:
 - Ha de retener los sólidos para dar lugar a un filtrado razonablemente claro.
 - No debe obstruirse y la resistencia al flujo de filtrado debe ser mínima.
 - Debe ser resistente al calor, al ataque químico, a la abrasión y flexión y debe sostener la presión de filtración.
 - La torta debe ser fácil de descargar y de limpiar.
 - No ha de ser excesivamente caro.

Diversos autores (Perry y Green, 2008; Rosabal y Valle, 2006) consideran que los factores que influyen en el proceso de filtración son: presión, espesor de la torta, viscosidad de la suspensión, naturaleza de los sólidos, temperatura, tamaño de las partículas, medio filtrante y concentración de sólidos.

La filtración ha sido ampliamente utilizada en diversas investigaciones sobre la separación de SH en sistemas acuáticos a escala de laboratorio. Algunas de las técnicas más utilizadas son la ultrafiltración (Weng *et al.*, 2012; Zavarzina *et al.*, 2002) y la nanofiltración (Wang *et al.*, 2016).

Weng *et al.* (2012) considera que los estancamientos durante la ultrafiltración limitan el empleo de esta operación, lo que provoca aumento de la resistencia a la filtración y disminuye el flujo de filtrado, por lo que se incrementa el costo de operación debido al reemplazo o mantenimiento de la membrana. Para disminuir este efecto se emplea la técnica electro-ultrafiltración, con un incremento en la remoción de SH presentes en aguas naturales de aproximadamente el 10 %, pero el empleo de electricidad incrementa los costos de operación.

Por otro lado, en estudios realizados por Pedroso (2007), se demuestra que el empleo de la filtración al vacío para la separación y fraccionamiento de SH, obtenidas a partir de humus de lombriz, se dificulta, debido a la compresibilidad de la torta.

1.3.2. Centrifugación

La centrifugación constituye uno de los métodos de mayor uso para el fraccionamiento de las sustancias húmicas a escala de laboratorio. Las técnicas varían en cuanto a velocidad (2 000 a 5 000 rpm) y tiempo de centrifugación (10 a 30 min) en dependencia de la materia prima, sustancia extractante y concentración empleada fundamentalmente (Fuentes *et al.*, 2018; Jana *et al.*, 2016; Lukyanov *et al.*, 2016; Raposo *et al.*, 2016; Saito y Seckler, 2014; Tsuda *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2018), aunque en algunos casos se combina la centrifugación y la ultrafiltración para lograr mayor grado de separación (Chianese *et al.*, 2020)

De acuerdo con Kasatkin (1981), la centrifugación es el procedimiento de separación de sistemas heterogéneos, específicamente emulsiones y suspensiones, en el campo de la fuerza centrífuga.

Martín *et al.* (2011) no consideran la centrifugación como una operación de separación por sí misma, sino que consiste en operaciones de sedimentación y/o de filtración, donde la fuerza impulsora es la acción de la fuerza centrífuga, tal como se indica en la figura 1.2; pero por su complejidad, no se pueden aplicar los mismos principios de sedimentación y de filtración, por lo que es necesario su estudio independiente. De acuerdo con lo anterior, las centrífugas para la separación de sólidos contenidos en líquidos son generalmente de dos tipos: centrífugas de sedimentación y centrífugas de filtración (Perry y Green, 2008).

1.3.3. Sedimentación

La operación de sedimentación consiste en separar de una suspensión el fluido claro sobrenadante de las partículas sólidas, las cuales forman un lodo con una elevada concentración de dichas partículas (Kasatkin, 1981; Martín *et al.*, 2011). Dentro de los factores que afectan la velocidad de sedimentación y, por tanto, la eficiencia de la separación, se encuentran los siguientes:

- La diferencia de densidad entre el sólido y el fluido: La velocidad de separación será mayor a medida que aumente la diferencia de densidad (Martín *et al.*, 2011; Perry y Green, 2008; Rosabal y Valle, 2006).

- Forma y masa de la partícula (Martín *et al.*, 2011; Rosabal y Valle, 2006).
- Concentración de la suspensión: Cuando la concentración de partículas suspendidas en un líquido es baja, ocurre la sedimentación libre o levemente obstaculizada y se realiza a velocidad constante en toda la torre; mientras que, para altas concentraciones de la fase sólida, ocurre la sedimentación obstaculizada (Perry y Green, 2008; Rosabal y Valle, 2006).
- Viscosidad del fluido: Mientras menor es la viscosidad, mayor será la velocidad de sedimentación (Rosabal y Valle, 2006).
- Temperatura: Un aumento de la temperatura provoca una disminución de la viscosidad del líquido, la cual es inversamente proporcional a la velocidad de sedimentación (Kasatkin, 1981; Rosabal y Valle, 2006).

Aunque el grado de separación de las fases en el proceso de sedimentación es menor, comparado con otros procedimientos de separación de sistemas heterogéneos, la sedimentación resulta menos costosa, pues cuenta con la ventaja económica de que aprovecha los efectos de la gravedad, donde el gasto energético es menor (Kasatkin, 1981; Rosabal y Valle, 2006).

1.3.4. Exprimido

El exprimido consiste en la separación de líquido de un sistema sólido-líquido mediante la compresión, de forma tal que el líquido escapa mientras el sólido queda retenido entre las superficies de compresión. A diferencia de la filtración, la separación ocurre por la presión que ejerce el movimiento de las paredes de contención sobre la mezcla, y no mediante el bombeo del material a un espacio fijo. Se emplea para separar sistemas que no se pueden bombear fácilmente y se desea una extracción más completa del líquido de la torta (Perry y Green, 2008).

Las concentraciones de sólidos empleados como materias primas para la obtención de SH son bajas, donde la relación solido-líquido, por lo general, toma los siguientes valores: 1/5; 1/10; 1/15 (Wei *et al.*, 2020; Wnuk *et al.*, 2020), lo que hace que este método no sea usado para la separación y fraccionamiento de las mismas.

1.4. Diseño de plantas químicas

La etapa de síntesis o diseño de un proceso se da de inicio mediante la formulación de un problema. Se definen las entradas y salidas del sistema, la secuencia de las operaciones, condiciones de operación, los deberes, las especificaciones principales, y materiales de construcción de todos los equipos del proceso, la disposición general de los equipos necesarios para asegurar el funcionamiento adecuado de la planta, y la instrumentación principal. Se resume en un diagrama de flujo, los balances de materiales y energía, así como un conjunto de especificaciones individuales de los equipos, que permita la transformación deseada de los reactivos a productos.

Según turton las tres etapas principales en el esquema del proceso de síntesis y diseño de un proceso químico son:

1. Creación del nuevo proceso: el diseño surge de una idea básica, que puede originarse como resultado de una solicitud de un cliente, o para satisfacer la demanda de un producto. Si el análisis inicial indica que la idea puede tener posibilidades de convertirse en un proyecto valioso, se inicia una investigación preliminar, donde se analizan las operaciones físicas y químicas involucradas, aspectos económicos. Se crea una base de datos, se realizan experimentos a escala de laboratorio donde se producen muestras del producto final y se definen, para la síntesis preliminar del proceso, si es continuo o discontinuo, el estado químico y las operaciones implicadas.
2. Desarrollo del caso base: cuando las potencialidades del proceso están bien establecidas, el proyecto se encuentra listo para la fase de desarrollo. En este punto, se realiza el diagrama de flujo detallado y se aplican técnicas de integración de procesos, que permitan minimizar el consumo de utilidades. Se puede construir una planta piloto, que constituye una réplica a pequeña escala de la planta industrial. Se realiza la simulación de la planta mediante simuladores de plantas químicas.
3. Diseño detallado: Se realizan estimaciones de costo de capital para la planta propuesta, un análisis completo de los costos y beneficios del proceso que se desarrolla y retornos probables de la inversión realizada. Se precisan los detalles del diseño, donde se incluyen controles, servicios, las disposiciones de tuberías, las

especificaciones y los diseños para las piezas individuales de los equipos y diversas informaciones necesarias para la construcción de la planta. La etapa final consiste en la adquisición de los equipos, construcción y puesta en marcha de la planta, mejoras generales en las operaciones y desarrollo de los estándares y procedimientos operativos para obtener los mejores resultados.

Para el desarrollo del caso base es necesario la aplicación de heurísticas, las cuales son relaciones formadas sobre la base de la experiencia de científicos y son una fuente segura que en muchas ocasiones son empleadas por los ingenieros para el escalado. En esta investigación se hace referencia a las heurísticas de Walas (1990) a partir de las operaciones involucradas en el proceso estudio, las cuales son:

- Mezclado y Agitación
1. La agitación leve se obtiene haciendo circular el líquido con un impulsor a velocidades superficiales de 0,03 a 0,06 m/s, y la agitación intensa a 0,21 a 0,3 m/s
 2. Las intensidades de agitación que se muestra en la tabla 1.4 con los impulsores en tanques con deflectores se miden por la potencia de entrada, kJ/s por m³, y velocidades de punta del impulsor

Tabla 1.4. Intensidades de agitación (Walas, 1990)

Operación	kJ/s por m ³	Velocidad de punta (rpm)
Mezcla	0,037 - 0,093	
Reacción homogénea	0,093 - 0,28	7,5 - 10
Reacción con transferencia de calor	0,28 - 0,93	10 - 15
Mezclas líquido-líquido	0,93	15 - 20
Mezclas líquido-gaseosas	0,93 - 1,86	15 - 20
Lodos	1,86	

3. Proporciones de un tanque agitado en relación con el diámetro D:

Nivel del líquido = D

Diámetro del impulsor de la turbina = D/3

Nivel del impulsor sobre el fondo = D/3

Ancho de la pala del impulsor = D/15

Cuatro deflectores verticales con ancho = D/10

4. Las hélices se hacen a un máximo de 0,54 m, los impulsores de la turbina a 2,7 m
5. Las burbujas de gas burbujeadas en el fondo del recipiente provocarán agitación leve a una velocidad de gas superficial de 0,005 m/s, agitación severa a 0,02 m/s
6. Se logra la suspensión de sólidos con una velocidad de sedimentación de 0,009 m/s, ya sea con turbina o hélices, pero cuando la velocidad de asentamiento es superior a 0,045 m/s se necesita una agitación intensa con una hélice
7. La potencia para conducir una mezcla de un gas y un líquido puede ser del 25 a 50 % menos que el poder de conducir el líquido solo

8. Los mezcladores en línea son adecuados cuando un segundo o dos tiempos de contacto es suficiente, con entradas de potencia de 18,64 a 37,28 J/s por m³

– Buques (Tanques de almacenamiento)

1. Por menos de 4,00 m³, use tanques verticales sobre patas
2. Entre 4,00 y 40 m³, use tanques horizontales en soportes de concreto
3. Más allá de 40 m³, use tanques verticales sobre cimientos de concreto
4. Los líquidos sujetos a pérdidas respiratorias pueden almacenarse en tanques con flotación o techos de expansión para la conservación
5. El francobordo es 15 % inferior a 2 m³ y 10 % superior a 2 m³ de capacidad
6. La capacidad de 30 días a menudo se especifica para materias primas y productos, pero depende de la conexión de los horarios del equipo de transporte
7. Las capacidades de los tanques de almacenamiento son al menos 1,5 veces el tamaño de conectar equipos de transporte; por ejemplo, tanques de 30 gal en camiones, tanque de 34 500 gal en automóviles, y capacidades ilimitadas en barcas y camiones cisterna

En la bibliografía especializada existe poca información sobre procesos de producción de sustancias húmicas. A continuación, se muestran algunos ejemplos:

Mema (2006) propone un proceso de producción de ácido húmico continuo a gran escala, a partir de residuos de una papelera que mezcla pino y eucalipto. El mismo consta de tanques de extracción y centrifugas para las operaciones de separación. Se utiliza NaOH_(ac) y HCl_(ac) como extractantes.

Schwartz *et al.* (1968) diseñan un proceso para obtener ácido húmico a partir de leonardita y otras fuentes resultantes de la oxidación del carbón. Utilizan hidróxido de sodio y ácido clorhídrico como extractantes, y atmósfera inerte en la extracción básica para evitar alteraciones en la materia orgánica.

1.5. Conclusiones del capítulo

1. Las sustancias húmicas constituyen excelentes abonos orgánicos y se fraccionan en ácidos húmicos, ácidos fúlvicos y humina, según su solubilidad; estas sustancias están compuestas en su mayoría por carbono, oxígeno, nitrógeno, hidrógeno y azufre.
2. Los extractantes alcalinos más utilizados para la separación de las sustancias húmicas son el hidróxido de sodio y el hidróxido de potasio, y los ácidos son el ácido clorhídrico y el ácido sulfúrico.
3. El rendimiento del proceso de extracción de sustancias húmicas depende del tipo de extractante empleado y de la fuente orgánica a utilizar como materia prima.
4. En el diseño industrial de las etapas de separación y fraccionamiento de sustancias húmicas se deben realizar pruebas simples de sedimentación y centrifugación, a partir de técnicas de escalado de la sedimentación en probetas.
5. El diseño de un proceso de obtención de ácido húmico requiere de la definición del tipo de proceso y las diferencias moleculares, de presión, temperatura y fase existentes; para lograr la integración de todas las operaciones unitarias que confluyen en el mismo.

CAPÍTULO 2. ETAPA EXPERIMENTAL PARA LA OBTENCIÓN DE ÁCIDO HÚMICO

El objetivo del capítulo es mostrar la etapa experimental de la investigación y poder llegar a las condiciones óptimas de operación en el proceso de obtención de ácido húmico. Para ello se siguen las etapas que se muestran en la figura 2.1.

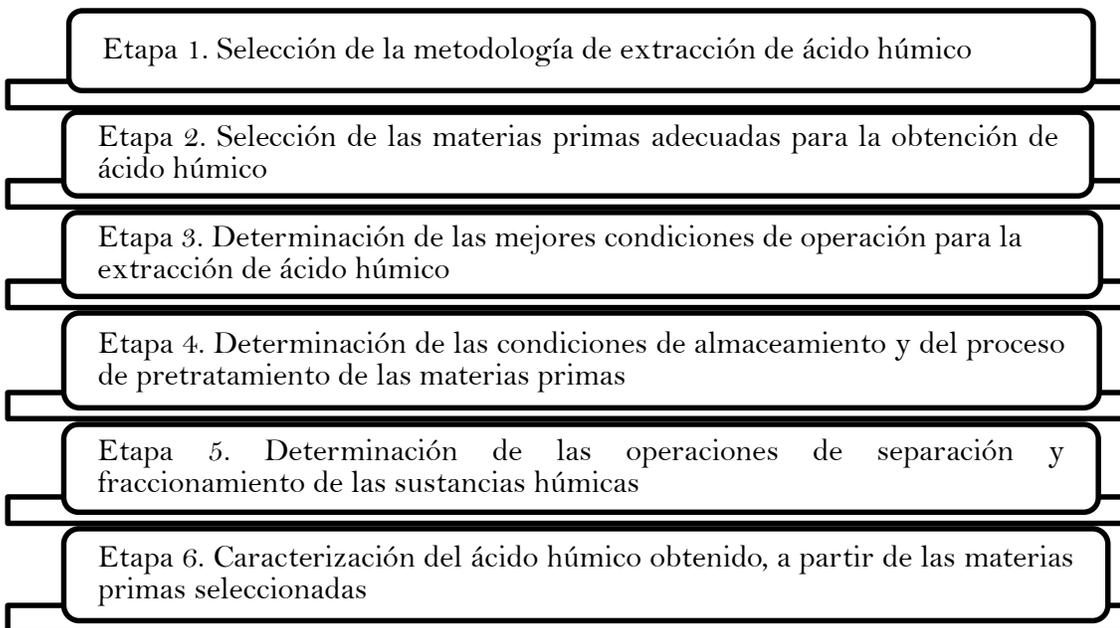


Figura 2.1. Etapas de la estrategia experimental

Para llevar a cabo la investigación se estudian las principales materias primas disponibles y los posibles pretratamientos a realizar, así como metodologías de extracción de sustancias húmicas, basadas en su solubilidad. Además, se determinan las mejores condiciones de operación para la extracción de sustancias húmicas. Para todo ello, se desarrolla un sistema de diseños experimentales y se aplican técnicas de optimización (Montgomery, 2017). Se utiliza el paquete estadístico STATGRAPHICS PLUS y se define un 90 % de confianza.

También se realiza una caracterización química del producto obtenido, a partir de un análisis elemental, de micro y macro elementos y de espectrofotometría infrarroja.

2.1. Etapa 1: Selección de la metodología de extracción de sustancias húmicas

La metodología de extracción de sustancias húmicas que se aplica en la investigación es la recomendada por la Sociedad Internacional de Sustancias Húmicas (Sun *et al.*, 2020) y reportado por varios autores (De Oliveira *et al.*, 2016; De Souza y Roca, 2018; Lukyanov *et al.*, 2016; Saito y Seckler, 2014). La misma consta de dos etapas fundamentales, la primera es la extracción de sustancias húmicas con un extractante básico (EB) o extracción básica, y la segunda es el fraccionamiento de las sustancias húmicas con un extractante ácido (EA) o extracción ácida, tal como muestra en la figura 2.2.

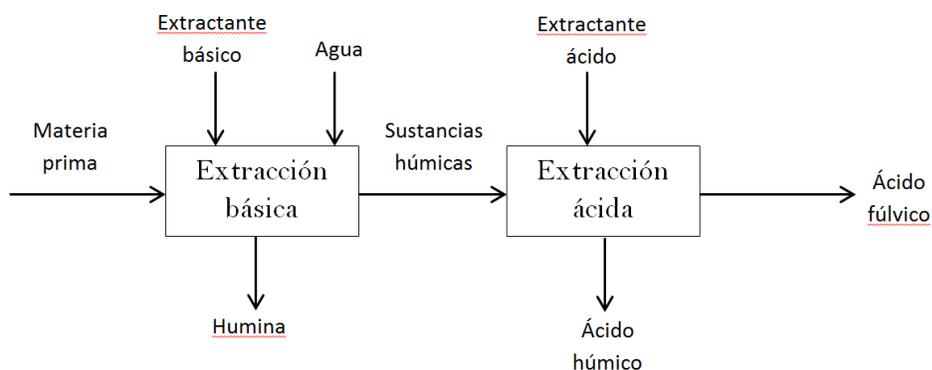


Figura 2.2. Etapas de obtención de ácido húmico

2.1.1. Condiciones experimentales para la extracción de ácido húmico

Para el proceso de obtención de ácido húmico varios autores (De Oliveira *et al.*, 2016; De Souza y Roca, 2018; Lukyanov *et al.*, 2016; Saito y Seckler, 2014) recomiendan el empleo del $\text{NaOH}_{(\text{ac})}$ y $\text{KOH}_{(\text{ac})}$ como extractantes básicos, y como extractantes ácidos el $\text{HCl}_{(\text{ac})}$ y $\text{H}_2\text{SO}_{4(\text{ac})}$ (tabla 2.1). Las muestras de materia prima (estiércol de ganado vacuno) son trituradas y se pasan por un tamiz de 2 mm, según recomendaciones de Xu *et al.* (2017).

Tabla 2.1. Extractantes para la producción de ácido húmico

Extractante básico	Extractante ácido	Fuente
NaOH (0,5 mol/L)	HCl (6 mol/L)	(De Oliveira <i>et al.</i> , 2016; De Souza y Roca, 2018)
KOH (0,5 mol/L)	H ₂ SO ₄ (6 mol/L)	(Lukyanov <i>et al.</i> , 2016; Saito y Seckler, 2014)

Las condiciones experimentales de cada etapa del proceso son:

- Extracción básica: Con condiciones de extracción de una relación sólido líquido igual a 0,1 g/mL y una concentración de extractante básico de 0,5 mol/L, según estudios realizados por (De Souza y Roca, 2018; Pedroso *et al.*, 2021). Se agita la suspensión durante 24 h (Sun *et al.*, 2020). Luego se centrifuga a 3200 rpm por 10 min (Baglieri *et al.*, 2007; Pedroso *et al.*, 2021; Saito y Seckler, 2014), donde el sobrenadante son las sustancias húmicas y el precipitado la humina.
- Extracción ácida: Las sustancias húmicas son tratadas con el extractante ácido (6 mol/L) (Asing *et al.*, 2009; Pedroso *et al.*, 2021) y se mantiene en reposo por 24 h (Sun *et al.*, 2020). Luego se centrifuga a 3200 rpm por 10 minutos (Pedroso *et al.*, 2021; Saito y Seckler, 2014). El sobrenadante es el ácido fúlvico y el precipitado el ácido húmico.

2.1.2. Diseño experimental para seleccionar la mejor combinación de extractantes

Para seleccionar la metodología de extracción de ácido húmico se identifican como variables de selección el rendimiento de extracción de AH y el Beneficio Bruto. Se planifica un diseño factorial multinivel con dos factores (tipo de EB y tipo de EA) y dos niveles cada uno (tabla 2.2). Cada experimento se realiza por triplicado, según lo establecido por Montgomery (2017). Se aplica un análisis de varianza multifactorial.

Tabla 2.2. Diseño experimental

Experimento	Extractante básico (EB)	Extractante ácido (EA)
1	NaOH _(ac)	H ₂ SO _{4(ac)}
2	NaOH _(ac)	HCl _(ac)

3	KOH _(ac)	H ₂ SO _{4(ac)}
4	KOH _(ac)	HCl _(ac)

El rendimiento de extracción de AH se calcula por la ecuación 2.1 (Jana *et al.*, 2016).

$$Rend (AH) = \frac{m_{AH}}{m_{MP}} * 100 \quad (\text{ec. 2.1})$$

Donde:

Rend (AH): Rendimiento de extracción de AH (%).

m_{AH}: Masa de ácido húmico extraída (g)

m_{MP}: Masa de materia prima (g)

La valoración económica preliminar de los experimentos se realiza a partir del beneficio bruto (BB), que se determina por la ecuación 2.2.

$$BB = VP - \sum CM \quad (\text{ec. 2.2})$$

El beneficio bruto se calcula por kg de AH producido y sólo se tienen en cuenta los costos (CM) de los extractantes y el agua, y el valor de la venta del ácido húmico (VP).

Los costos de materiales se determinan en función de las cantidades consumidas y el costo unitario de cada uno y el valor del producto con el precio unitario del ácido húmico (tabla 2.3)

Las cantidades de materiales consumidos de extractante básico, agua y extractante ácido se calculan para 1 kg de ácido húmico. Se tiene en cuenta la relación experimental entre la masa que se consume y la que se obtiene de ácido húmico en cada experimento.

La cantidad de agua consumida se calcula como la suma del agua consumida en cada extractante y la adicionada para garantizar la relación sólido/líquido 1/10.

Tabla 2.3. Costo y precios de materiales y productos (Pedroso *et al.*, 2021)

Materiales auxiliares	Costo unitario		Fuente
	Unidad	Valor	
Cachaza	\$/t	18,5	Ficha de venta de la Delegación del MINAG Matanzas (MINAGRI, 2021)
Estiércol de ganado vacuno	\$/t	13,80	(Pedroso <i>et al.</i> , 2021)
Hidróxido de sodio	\$/t	460,93	Ficha de precios de la Empresa Electroquímica Sagua
Agua	\$/m ³	1,55	Ficha técnica de la Delegación INRH Matanzas
Ácido sulfúrico	\$/t	150	Ficha de precios de la UEB Rayonitro
Ácido húmico	s/kg	11,55	Laboratorio de Tecnologías Biológicas Jiangsu Zhifeng

2.1.3. Resultados de esta etapa

Los resultados experimentales obtenidos para cada experimento y las cantidades consumidas de extractante básico, extractante ácido y agua, para obtener 1 kg de ácido húmico, se muestran en el anexo 1.

La tabla ANOVA (tabla 2.4) arroja que el tipo de extractante no influye de forma significativa en el rendimiento de extracción de AH, para un 90 % de confianza, pues los valores de probabilidad son superiores a 0,10. En estudios realizados por Pedroso *et al.* (2022), se analizan tres materias primas diferentes y los mismos tipos de extractantes básicos y ácidos y se demuestra que solo influyen en la extracción la materia prima utilizada. Esto concuerda con estudios realizados por Lukyanov *et al.* (2016) y Saito y Seckler (2014), donde comprueban que los rendimientos en la extracción de sustancias húmicas no varían de forma significativa, en dependencia del tipo de extractante utilizado. Tampoco influye la interacción entre los dos factores, con un valor de probabilidad mayor que 0,10 (0,2149).

Tabla 2.4. Tabla ANOVA, para el rendimiento de extracción de AH, en dependencia del tipo de extractante

Efecto	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Valor p
Extractante básico	3,00	1	3,00	0,2149
Extractante ácido	2,25	1	2,25	0,2767
Extractante básico – Extractante ácido	3	1	1,81	0,2149
Error	13,23	9	1,80	
Total	21,48	11		

Si bien la combinación 2 ($\text{NaOH}_{(\text{ac})} - \text{HCl}_{(\text{ac})}$) arroja el mayor valor de rendimiento de extracción de AH (35,93 %) y el mejor beneficio bruto (20,65 \$/kg AH) (ver tabla 2.5), para seleccionar la mejor combinación se analizan además la disponibilidad, su aplicación y el costo de estos extractantes.

Tabla 2.5. Rendimiento de extracción de AH y beneficio bruto para cada combinación

Combinación de extractantes	Extractante básico	Extractante ácido	Rend (AH) (%)	BB (\$/kg AH)
1	NaOH _(ac)	H ₂ SO _{4(ac)}	34,07	19,46
2	NaOH _(ac)	HCl _(ac)	35,93	20,65
3	KOH _(ac)	H ₂ SO _{4(ac)}	24,33	11,11
4	KOH _(ac)	HCl _(ac)	33,93	17,57

Aunque los dos extractantes ácidos que se usan en la investigación son de producción nacional, el ácido clorhídrico es más costoso (3372,79 \$/t) que el ácido sulfúrico (2750 \$/t), según datos reportados por el Grupo Empresarial de la Industria Química. Además, el ácido sulfúrico se produce en el territorio, lo que disminuiría los costos de transportación.

De los dos extractantes básicos, el hidróxido de sodio es de producción nacional y tiene mayor aplicación en la extracción de sustancias húmicas que el hidróxido de potasio (De Souza y Roca, 2018; Fuentes *et al.*, 2018; Olk *et al.*, 2019; Zularisam *et al.*, 2017).

Teniendo en cuenta todo lo expuesto con anterioridad, se selecciona la combinación extractantes básico y ácido NaOH_(ac) – H₂SO_{4(ac)} respectivamente, para la producción de ácido húmico.

2.2. Etapa 2: Selección de las materias primas adecuadas para la obtención de sustancias húmicas

Como se define en el capítulo anterior, las posibles fuentes de sustancias húmicas a utilizar en la investigación son: humus de lombriz (HL), compost (COMP), estiércol de ganado vacuno (EGV) y cachaza (C). Para la selección de las fuentes más adecuadas se tienen en cuenta tres aspectos: la caracterización química, el rendimiento en la extracción y la disponibilidad.

2.2.1. Proceso de muestreo

El humus de lombriz y el compost fueron producidos por el Laboratorio Provincial de Suelos, este último obtenido a partir de un proceso de compostaje de una mezcla de estiércol de ganado y desechos de plantas. Para ambas se emplea el método de muestreo establecido en la Norma ISO 5667-1:2006. En el muestro puntual se empleó la metodología de procesamiento de muestra basada en el método de subdivisión por cuarteo, y para la conformación de las muestras compuestas se tuvo en cuenta la combinación de todas las muestras puntuales, mezclándolas en proporción directa a la fracción que representan.

La cachaza es proveniente de los tres centrales activos de la provincia en el momento de la experimentación, se toman las muestras de los centrales Jesús Rabí, Mario Muñoz y México. El estiércol de ganado vacuno proviene de la Empresa Genética de Matanzas.

2.2.2. Caracterización de las materias primas

Las materias primas se caracterizan a partir de los parámetros químicos de calidad establecidos por (Funes y Vázquez, 2016). Se determinan la humedad y contenidos de: materia orgánica, nitrógeno, fósforo, potasio, sodio, calcio y magnesio. Los experimentos se realizaron por triplicado (Montgomery (2017). A continuación, se resumen los métodos que se aplican para determinar cada parámetro (Funes y Vázquez, 2016):

- Humedad y el contenido de materia orgánica: a partir del método gravimétrico.
- Contenido de fósforo: se determina por el método colorimétrico con lectura en un fotómetro de llama.
- Contenido de sodio y potasio: se aplica el método Espectrofotométrico.
- Contenido de calcio: por volumetría, con el indicador Murexida y se valora con solución 0,02 N de EDTA.
- Contenido de magnesio: por volumetría, con el indicador Eriocromo negro T y se valora con solución EDTA.

Los resultados de la caracterización química de las fuentes de sustancias húmicas aparecen en la tabla 2.6. En aras de determinar si existen diferencias significativas se realiza un análisis de varianza unifactorial.

El contenido de materia orgánica (MO) es de vital importancia en estas fuentes, debido a la carencia que presentan los suelos de este componente, provocado por el uso irracional del mismo y de productos químicos (Reyes *et al.*, 2017), siendo el componente de interés del ácido húmico (AH).

El anexo 2 muestra que existen diferencias significativas en el contenido de MO y la humedad entre las materias primas, para un 90 % de confianza, pues presentan un valor de probabilidad (p) inferior a 0,10 (0,0000) en ambos casos.

En la tabla 2.6 se observa que el estiércol de ganado vacuno y la cachaza son las materias primas que presentan mayor contenido de MO (77,52 % y 75,21 %) resultados que concuerdan con Galba *et al.* (2010) y Calderín *et al.* (2016), demostrando su elevado valor como fuentes de SH. Ambas poseen además los mayores porcentajes de humedad (55,01 % y 65,79 %), lo que favorece un menor consumo de agua, en dependencia de la relación sólido-líquido utilizada en la extracción básica.

Tabla 2.6. Caracterización química de las materias primas analizadas

Parámetros	Fuente			
	Humus de lombriz	Compost	Estiércol de ganado vacuno	Cachaza
Humedad (%)	35,17	41,38	55,01	65,79
Materia orgánica (%)	43,77	46,89	77,52	75,21
Fósforo (mg/L)	0,87	0,85	0,83	0,84
Potasio (mg/L)	0,72	0,79	0,75	0,74
Sodio (mg/L)	0,39	0,40	0,40	0,40
Calcio (mg/L)	2,79	2,80	2,88	2,91
Magnesio (mg/L)	1,22	1,24	1,26	1,26

La composición de sodio, calcio, magnesio, potasio y sodio no varían considerablemente entre las diferentes fuentes, es decir, el tipo de materia prima no influye en estos

parámetros para un 90 % de confianza, pues el análisis de varianza para todos los casos arroja valores de probabilidad (p) superiores a 0,10 (anexo 2).

2.2.3. Rendimiento de extracción del ácido húmico

Para estudiar el rendimiento de la extracción de ácido húmico, se planifica un diseño experimental unifactorial categórico completamente aleatorizado, donde el factor es el tipo de materia prima, con cuatro niveles (humus de lombriz, compost, estiércol de ganado vacuno y cachaza), y tres réplicas cada experimento, según lo establecido por Montgomery (2017).

Para el proceso de extracción se aplica la metodología utilizada en el epígrafe 2.1, con el $\text{NaOH}_{(\text{ac})}$ y el $\text{H}_2\text{SO}_{4(\text{ac})}$, como extractantes básico y ácido respectivamente, según los resultados obtenidos en la etapa 1 de la investigación.

En esta etapa las muestras son trituradas y se pasan por un tamiz de 2 mm, según recomendaciones de Xu *et al.* (2017).

El rendimiento de extracción del contenido de materia orgánica en el AH (% EMO_{AH}), se calcula por la ecuación 2.3 (Fong *et al.*, 2007)

$$\% \text{EMO}_{\text{AH}} = \frac{X_{(\text{MO})\text{AH}} m_{\text{AH}}}{X_{(\text{MO})\text{MP}} m_{\text{MP}}} * 100 \quad (\text{ec. 2.3})$$

Donde:

m_{MP} : masa de materia prima (g)

m_{AH} : masa de ácido húmico obtenido (g)

$X_{(\text{MO})\text{MP}}$: composición de materia orgánica en la materia prima

$X_{(\text{MO})\text{AH}}$: composición de materia orgánica en el ácido húmico

% EMO_{AH} : Porcentaje de extracción del contenido de materia orgánica en el ácido húmico extraído (%)

El contenido de materia orgánica del ácido húmico se determina por métodos gravimétricos.

La tabla ANOVA (tabla 2.7) arroja que existen diferencias significativas en los rendimientos de extracción de MO en el AH entre las cuatro fuentes de materia prima, para un 90 % de confianza, pues el valor de probabilidad (p) es inferior a 0,10 (0,0000). La

prueba de múltiple rango de Duncan permite determinar que el rendimiento de extracción es diferente para las cuatro materias primas.

Tabla 2.7. Tabla ANOVA para el rendimiento de extracción de MO del AH

Tabla ANOVA				
Fuente	Suma de cuadrado	Grados de libertad	Cuadrado medio	P
Entre grupos	1565,61	3	521,87	0,0000
Dentro de grupo	9,96	8	1,24	
Total	1575,57	11		
Prueba de múltiple rango Duncan				
Contraste			Diferencia	
Cachaza - Compost			*14.5567	
Cachaza – Estiércol de ganado vacuno			*17.1267	
Cachaza – Humus de lombriz			*31.9767	
Compost – Estiércol de ganado vacuno			*2.57	
Compost – Humus de lombriz			*17.42	
Estiércol de ganado vacuno – Humus de lombriz			*14.85	
* indica las diferencias significativas				

El mayor porcentaje de extracción de materia orgánica se obtiene a partir de la cachaza (tabla 2.8), lo cual coincide con los resultados obtenidos por Galba *et al.* (2010), que plantea que este residuo es una fuente valiosa de sustancias húmicas. Además, según datos del grupo AZCUBA de la zafra 2021, existe una considerable disponibilidad de este residuo (605 641,6 kg/día).

Tabla 2.8. Rendimientos de extracción de MO en el AH y el valor de probabilidad

Materia prima	Valor medio (%)	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)
Humus de lombriz	25,90	0,33	1,28
Compost	43,32	1,18	2,72
Estiércol de ganado vacuno	40,75	0,81	1,99
Cachaza	57,93	1,68	2,91

Le sigue el compost y el estiércol de ganado vacuno con rendimientos de 43,32 % y 40,75 % respectivamente. El humus de lombriz reporta un menor de rendimiento de extracción que el resto de las materias primas.

2.2.4. Selección de las Materias Primas

El uso del compost y el humus de lombriz limitan su utilización para la producción de ácido húmico por su disponibilidad y el propio proceso de obtención, ya que es necesario que ocurra primero de forma adecuada el proceso de degradación, para después reutilizarlo como materia prima en el proceso de extracción.

A pesar de que el compost presenta un rendimiento de extracción superior al del estiércol de ganado vacuno, no es factible utilizarlo como materia prima pues el proceso de compostaje en sí y el control de las variables de operación, conllevarían gastos adicionales en la producción de ácido húmico.

Por la misma razón el humus de lombriz no se selecciona como una materia prima ventajosa, pues, aunque es un material orgánico muy utilizado en la agricultura orgánica, tanto en su forma integral como en la forma de extractos líquidos húmicos, su principal inconveniente es que su utilización a escala industrial sería un proceso complejo y costoso. Además su producción implica un elevado consumo de energía, necesario para acelerar el proceso de degradación de la materia orgánica (Mema, 2006).

El estiércol de ganado vacuno se ha aplicado directamente en suelos, principalmente en cultivos de ciclo corto. Este residuo hospeda esporádicamente patógenos zoonóticos provenientes del intestino del animal, como especies de *Salmonella spp.* y *Campylobacter* que, de no ser tratados, se transfieren al suelo, fuentes de agua y cultivos. La inactivación de los patógenos zoonóticos del estiércol de ganado vacuno se logra mediante compostaje termofílico aeróbico o almacenamiento, antes de su aplicación en los suelos, con un control estricto de parámetros como temperatura, pH, relación C/N, humedad (Ortiz, 2020). Si se valora que en la provincia existe una elevada disponibilidad de estiércol de ganado vacuno durante todo el año, que su proceso de recogida no es complejo, este residuo constituye una excelente materia prima para la producción de ácido húmico.

Teniendo en cuenta la disponibilidad y producción en el territorio de estiércol de ganado vacuno y cachaza, y que ambos tienen los mayores contenidos de materia orgánica (tabla 2.6), así como por el rendimiento que alcanzan en la extracción de materia orgánica (tabla 2.7); estos dos residuos constituyen una fuente valiosa de sustancias húmicas y por tanto son las seleccionadas como materias primas para el proceso de obtención de ácido húmico.

Todas estas ventajas hacen que la propuesta tecnológica se pueda macrolocalizar cerca de los centrales y las ganaderías del territorio.

2.3. Etapa 3: Determinación de las mejores condiciones operacionales de extracción de ácido húmico

En este epígrafe se determinan las mejores condiciones operacionales del proceso de extracción de ácido húmico (relación sólido - líquido y tiempos de extracción básica y ácida), a partir de las dos materias primas, cachaza y estiércol de ganado vacuno. Para la selección de las condiciones de extracción más factibles se tendrá en cuenta el porcentaje de extracción del contenido de materia orgánica en el ácido húmico obtenido (ecuación 2.3).

2.3.1. Condiciones experimentales de las variables operacionales

El método de extracción de sustancias húmicas que se aplica es el recomendado por la Sociedad Internacional de Sustancias Húmicas (Sun *et al.*, 2020). Las condiciones para la extracción de las sustancias húmicas son las establecidas en el epígrafe 2.1, con hidróxido de sodio y ácido sulfúrico, como extractantes básico y ácido respectivamente. Se debe señalar que se varían la relación sólido – líquido y los tiempos de extracción básica y ácida.

Tabla 2.8. Niveles de las variables operacionales en el diseño experimental

Factores	Unidad	Niveles	Fuente
Relación sólido-líquido (S/L)	g/mL	(1/15; 1/10; 1/5)	(Antilén <i>et al.</i> , 2014; Asing <i>et al.</i> , 2009; Baglieri <i>et al.</i> , 2007; De Souza y Roca, 2018; Pedroso <i>et al.</i> , 2021)
Tiempo de extracción básica (t _{EB})	h	(4; 8; 12)	(Asing <i>et al.</i> , 2009; Baglieri <i>et al.</i> , 2007; Pedroso <i>et al.</i> , 2021)
Tiempo de extracción ácida (t _{EA})	h	(4; 8; 12)	(Asing <i>et al.</i> , 2009; Baglieri <i>et al.</i> , 2007; Pedroso <i>et al.</i> , 2021; Saito y Seckler, 2014)

Para determinar las mejores condiciones operacionales de extracción del ácido húmico se planifica un diseño experimental de superficie de respuesta compuesto central ortogonal con tres factores (anexo 3 y tabla 2.8) y la variable respuesta es el rendimiento de extracción del contenido de materia orgánica en el ácido húmico (% EMO_{AH}), el cual se calcula por la ecuación 2.3 (Fong *et al.*, 2007).

2.3.2 Resultados de las condiciones operacionales para la cachaza

En el centro de las condiciones experimentales (experimentos 2 y 14) se obtienen los mayores porcentajes de extracción de MO en el AH (15,33 % y 15,39 % respectivamente), para una relación sólido líquido de 1/10 y tiempos de extracción básica y ácida de 8 h (anexo 4). Al analizar los resultados experimentales, se obtiene que influyen significativamente para un 90 % de confianza, los tiempos de extracción básica y ácida y sus interacciones cuadráticas sobre el rendimiento de este proceso (anexo 5 y figura 2.3), por lo que se realiza una optimización de los datos (Pedroso *et al.*, 2021).

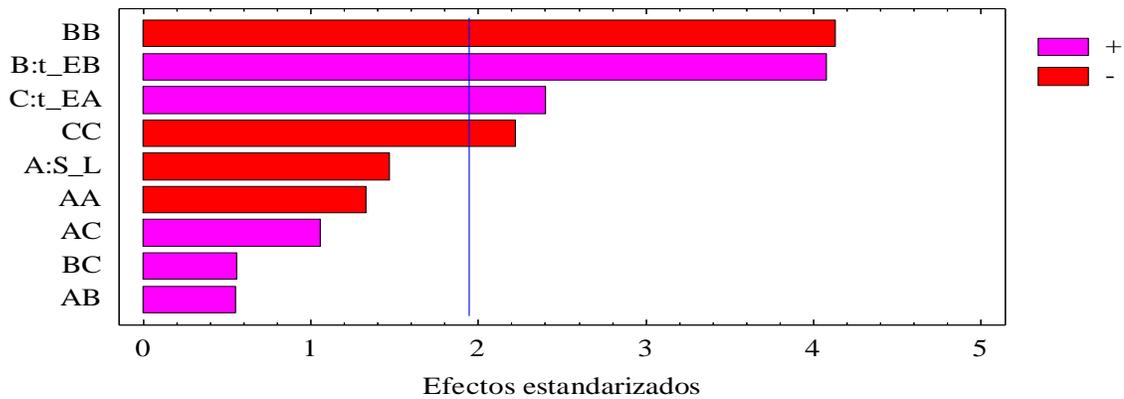


Figura 2.3. Diagrama de Pareto para el porcentaje de extracción de materia orgánica en el ácido húmico, a partir de la cachaza.

Las condiciones óptimas de extracción de materia orgánica en el ácido húmico son: 0,12 g/ml de relación sólido – líquido y un tiempo de cada extracción de 10 h, para un 15,72 % de materia orgánica en el AH (figura 2.4) (Pedroso *et al.*, 2021). Este resultado es superior al tomado como base por Fong *et al.* (2007), que fue de 9,06 %.

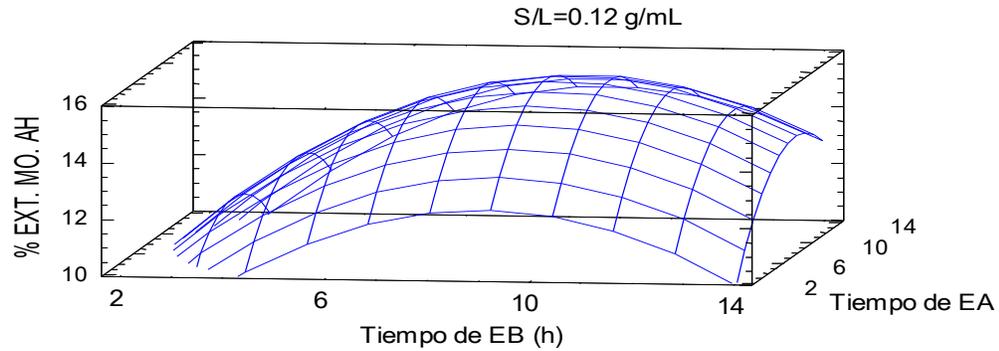


Figura 2.4. Superficie de respuesta para el porcentaje de extracción de materia orgánica en el ácido húmico, a partir de la cachaza.

La ecuación 2.4 predice el % de extracción de MO en el AH, en correspondencia con la influencia de los factores. El modelo matemático es significativo para un 90 % de confianza, pues arroja un R^2 igual a 80,76 %, un valor de probabilidad de 0,028, y un error medio de 0,90. Además el estudio de la probabilidad normal da un comportamiento lineal para los cuatros efectos significativos (figura 1 anexo 5).

$$\% \text{EMO}_{\text{AH}} = 2,03 + 1,77 * t_{\text{EB}} + 0,85 * t_{\text{EA}} - 0,09 * t_{\text{EB}}^2 - 0,04 * t_{\text{EA}}^2 \quad (\text{ec. 2.4})$$

Pedroso *et al.* (2021) obtienen los modelos matemáticos que permiten determinar las cantidades que se consumen de cada extractante, de cachaza y de agua para las condiciones óptimas (tabla 2.9), mostrando en el anexo 6 otros indicadores estadísticos que permiten validar estos modelos.

Tabla 2.9. Modelos de correlación para las cantidades de los productos involucrados en el proceso de extracción, a partir de la cachaza

Modelo	p	R ² (%)	Error medio
$m_{\text{cachaza}} = 17,87 + 381,04 S/L$ (ec. 2.5)	0,0000	93,01	6,09
$m_{\text{EB}} = 1/(0,096 + 2,23 S/L)$ (ec. 2.6)	0,0073	41,25	0,02
$m_{\text{H}} = 61,64 + 405,83 S/L$ (ec. 2.7)	0,0010	65,21	1,35
$m_{\text{SH}} = 387,51 - 988,45 S/L$ (ec. 2.8)	0,0031	58,96	4,59
$m_{\text{EA}} = 0,32 - 0,76 S/L$ (ec. 2.9)	0,0241	53,10	0,04
$m_{\text{agua}} = 20,81 + 214,98 S/L$ (ec. 2.10)	0,0000	83,31	4,91
$m_{\text{AF}} = 146,62 - 1025,60 \frac{S}{L} + 8,38t_{\text{EB}} + 7,59t_{\text{EA}}$ (ec.2.11)	0,0002	78,80	4,47
$m_{\text{AH}} = 5,56 + 1,39t_{\text{EB}} + 1,39t_{\text{EA}}$ (ec. 2.12)	0,0000	100,00	0,002
<i>Leyenda: m: cantidad de cada producto involucrado en el proceso, S/L: relación sólido – líquido, t_{EB}: tiempo de extracción básica, t_{EA}: tiempo de extracción ácida, p: valor de probabilidad</i>			

Para definir cada modelo matemático se tiene en cuenta la influencia de los factores, a partir del valor de probabilidad que debe ser menor o igual que 0,10 (anexo 6). Todos los modelos obtenidos reflejan una correlación estadísticamente significativa, para un 90 % de confianza, pues el valor de probabilidad del análisis de regresión es menor que 0,1, al igual que el de la prueba Durbin-Watson.

Para el caso de las cantidades de extractante básico y ácido a consumir arroja valores de R-cuadrado inferiores, pero otros indicadores de calidad de la regresión demuestran la correlación significativa entre las variables como son el valor de probabilidad y el error medio (tabla 2.9).

Para validar los modelos matemáticos se aplica el criterio del coeficiente R cuadrado ajustado de predicción, a partir de una parte de los experimentos realizados (Montgomery, 2017). El anexo 5 muestra los resultados para cada variable, en todas las variables superior al 75 %.

2.3.3. Resultados de las condiciones operacionales para el estiércol de ganado vacuno

El experimento 8 es el que arroja mayor porcentaje de extracción de MO en el AH (28,47 %), para una relación sólido líquido 1/10 y tiempos de extracción básica y ácida de 8 y 14 h respectivamente (anexo 7). Al analizar los resultados experimentales, se obtiene que influye la relación sólido-líquido sobre el rendimiento de este proceso (anexo 8 y figura 2.5). Esto coincide con lo planteado por Asing *et al.* (2009), donde demuestra el efecto que ejerce la relación sólido – líquido sobre el rendimiento de extracción de sustancias húmicas.

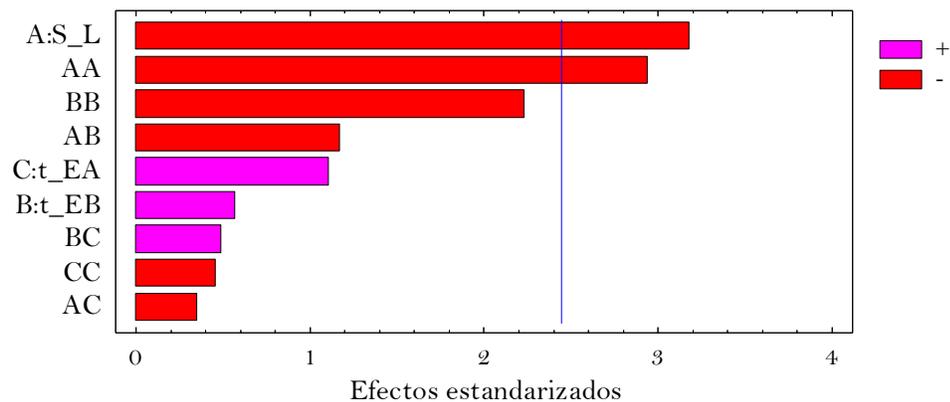


Figura 2.5. Diagrama de Pareto para porcentaje de extracción de MO en el AH, a partir del estiércol de ganado vacuno

La optimización arroja que las mejores condiciones de extracción de materia orgánica en el ácido húmico son: 1/10 g/ml de relación sólido – líquido, 10 h de EB y 13 h de EA, para 27,19 % de EMO_{AH} (figura 2.6). Estos resultados son similares a los obtenidos por (De Souza y Roca, 2018), que establece como mejores condiciones operacionales, 1/10 relación sólido líquido, y tiempos de extracción básica y ácida de 12 h cada una, y superiores al tomado como base por (Fong *et al.*, 2007) y el obtenido por (Pedroso *et al.*, 2021)

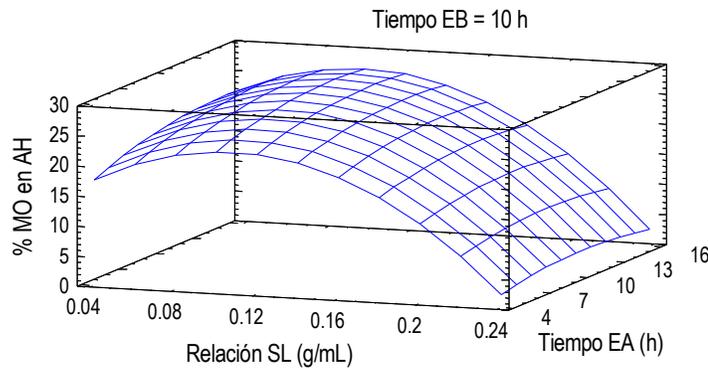


Figura 2.6. Superficie de respuesta para el porcentaje de extracción de MO en el AH, a partir del estiércol de ganado vacuno

La ecuación 2.13 predice el porcentaje de extracción de MO en el AH, en correspondencia con la influencia de los factores, el mismo es significativo para un 90 % de confianza, pues arroja un R^2 igual a 91,76 % y un valor de probabilidad de 0,0146.

$$\% EMO_{AH} = 12,86 + 185,24 * S/L - 927,67 * S/L^2 \quad (\text{ec. 2.13})$$

Los modelos matemáticos que permiten determinar los flujos de los extractantes, del estiércol de ganado vacuno y del agua y las cantidades producidas de humina, ácido húmico y ácido fúlvico para las condiciones óptimas, se muestran en la tabla 2.10.

Tabla 2.10. Modelos de correlación para las cantidades de los productos involucrados en el proceso de extracción, a partir del estiércol de ganado vacuno

Modelo		p	R ² (%)	Error
$m_{estiércol} = 15,00 + 332,84 S/L$	(ec. 2.14)	0,0000	93,01	3,32
$m_{EB} = 1/(0,096 + 2,23 S/L)$	(ec. 2.6)	0,0073	41,25	0,02
$m_H = 66,64 + 882,77 S/L$	(ec. 2.16)	0,0001	75,36	2,54
$m_{SH} = 391,22 - 1454,67 S/L$	(ec. 2.17)	0,0000	86,46	3,44
$m_{EA} = 0,32 - 0,76 S/L + 0,01t_{EB}$	(ec. 2.18)	0,0113	49,81	0,043
$m_{agua} = 398,93 S/L + 6,28 t_{EB}$	(ec. 2.19)	0,0091	60,49	0,025
$m_{AF} = 1/(0,001 + 0,024 S/L)$	(ec. 2.20)	0,0000	87,99	0,0005
$m_{AH} = 24,13 - 86,15 S/L$	(ec. 2.21)	0,0078	61,50	3,67
<i>Leyenda: m: cantidad de cada producto involucrado en el proceso, S/L: relación sólido – líquido, t_{EB}: tiempo de extracción básica, t_{EA}: tiempo de extracción ácida, p: valor de probabilidad</i>				

Al igual que para la cachaza, para definir cada modelo matemático se tiene en cuenta la influencia de los factores, a partir del valor de probabilidad que debe ser menor o igual que 0,10 (anexo 9). Todos los modelos obtenidos reflejan una correlación estadísticamente significativa, para un 90 % de confianza, pues el valor de probabilidad del análisis de regresión es menor que 0,10, al igual que el de la prueba Durbin-Watson. Se debe destacar, que para el caso de las cantidades de extractantes básico y ácido y del ácido fúlvico, los coeficientes R cuadrado son inferiores, pero cumplen con los otros parámetros de ajuste para un 90 % de confianza.

Para validar los modelos matemáticos se aplica el criterio del coeficiente R cuadrado ajustado de predicción, a partir de una parte de los experimentos realizados (Montgomery, 2017). El anexo 9 muestra los resultados para cada variable, en todas las variables superior al 75 %.

Los modelos matemáticos corroboran, los resultados de la optimización, que, en el proceso de extracción de ácido húmico a partir del estiércol de ganado vacuno, la relación sólido – líquido es el factor determinante.

2.4. Etapa 4: Determinación de las condiciones de almacenamiento de las materias primas.

En este epígrafe se determinan las condiciones y el tiempo de almacenamiento más adecuado para el estiércol de ganado vacuno y la cachaza.

2.4.1. Condiciones experimentales para el estudio de la etapa de almacenamiento de las materias primas

Se planifica un diseño experimental factorial multinivel, donde las variables independientes son las condiciones de almacenamiento y el tiempo de recolección de las materias primas. Se tienen en cuenta dos condiciones de almacenamiento (íntemperie y bajo techo), y se estudia durante un periodo de ocho semanas.

Las variables respuestas que se analizan son: las características físico-químicas de las materias primas (contenido de humedad, materia orgánica, fósforo, potasio, sodio, calcio, magnesio) y el % de extracción de MO en el AH, el cual se determina por las ecuaciones 2.4 y 2.13 para la cachaza y el estiércol de ganado vacuno respectivamente. La caracterización de las materias primas se desarrolla por las técnicas abordadas en el epígrafe 2.2.2.

La metodología de extracción aplicada es la descrita en el epígrafe 2.1, con hidróxido de sodio y ácido sulfúrico como extractante básico y ácido respectivamente, para las condiciones operacionales óptimas definidas en la etapa anterior para cada materia prima.

2.4.2. Resultados para las condiciones de almacenamiento de la cachaza

El anexo 10 muestra los resultados de la caracterización físico química de la cachaza y la tabla 2.11 un resumen de los diferentes parámetros para cada condición de almacenamiento. El contenido de materia orgánica (MO) de la cachaza se mantiene estable durante las ocho semanas de experimentación para las dos condiciones de almacenamiento, pues presenta coeficientes de variación iguales a 4,77 % y 6,35 % respectivamente (tabla 2.11), esto indica que este residuo de la industria azucarera no sufre proceso de oxidación de la materia orgánica, lo cual es favorable para su uso como materia

prima en la obtención de ácido húmico, según Galba *et al.* (2010). La tabla ANOVA (anexo 11) arroja que no existen diferencias significativas en el contenido de MO entre las condiciones en que se almacena y en el tiempo de almacenamiento para un 90 % de confianza, pues los valores de probabilidad son superiores a 0,10 (0,4541 y 0,6052), por lo que no es necesario almacenar la cachaza en áreas techadas, para su uso en la extracción de ácido húmico, lo que reduce los costos. Esto se refleja también en la figura 2.7 donde el comportamiento de este parámetro es similar para ambas condiciones de almacenamiento.

Tabla 2.11. Resumen de los resultados experimentales para las diferentes condiciones de almacenamiento de la cachaza, durante ocho semanas.

Parámetro / Condición de almacenamiento	Bajo techo			Intemperie		
	Media	S	CV (%)	Media	S	CV (%)
MO (%)	75,86	3,62	4,77	77,66	4,93	6,34
Humedad (%)	30,93	22,00	71,13	38,97	27,78	71,30
Fósforo (mg/L)	0,76	0,011	1,48	0,77	0,012	1,51
Potasio (mg/L)	0,60	0,04	6,81	0,59	0,03	4,92
Sodio (mg/L)	0,015	0,009	6,17	0,15	0,009	6,17
Calcio (mg/L)	4,04	0,16	3,94	4,05	0,16	3,99
Magnesio (mg/L)	1,79	0,05	2,95	1,78	0,08	4,61
% EMO _{AH}	18,66	9,88	52,95	12,46	6,56	52,64

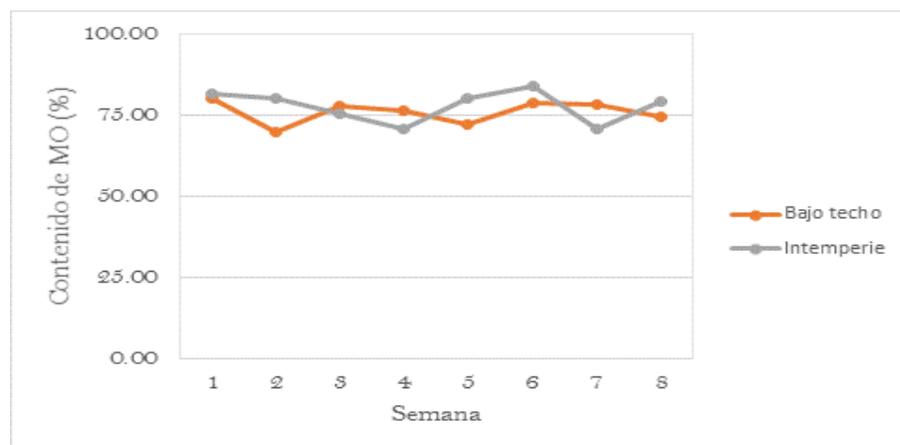


Figura 2.7. Comportamiento del porcentaje de la materia orgánica con respecto a las condiciones de almacenamiento de la cachaza.

La humedad muestra inestabilidad en el periodo, pues presenta un coeficiente de variación igual a 70,29 % (tabla 2.11), esto se debe a que la cachaza es un coloide amorfo que absorbe grandes cantidades de agua (Forero *et al.*, 2008). Sin embargo, el análisis de varianza (anexo 11) arroja que no existen diferencias significativas en los resultados de humedad para las dos condiciones de almacenamiento en el tiempo de estudio, pues arroja valores de probabilidad superiores a 0,1. Este parámetro tiene estrecha relación con la cantidad de agua a añadir en el proceso de extracción, para mantener la relación sólido – líquido deseada. La figura 2.8 muestra la inestabilidad que existe en la humedad para las condiciones de almacenamiento de ambas materias primas.

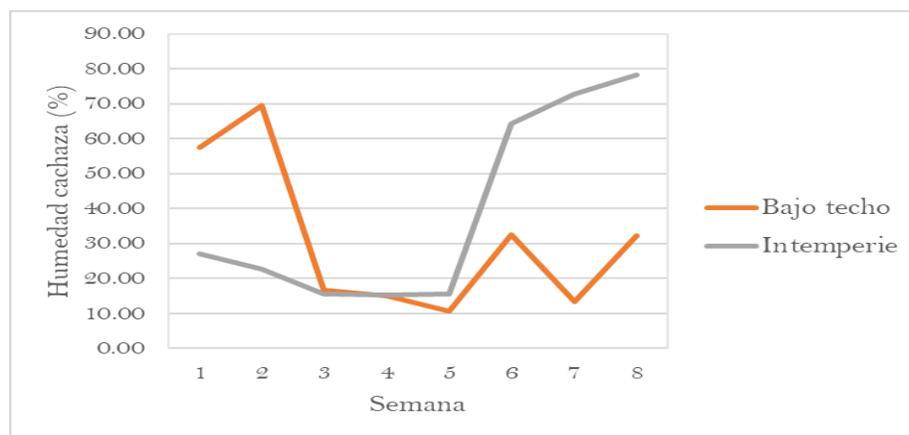


Figura 2.8. Comportamiento del porcentaje de humedad con respecto a las condiciones de almacenamiento de la cachaza en las ocho semanas.

El tiempo y las condiciones de almacenamiento de la cachaza, no influyen significativamente para un 90 % de confianza, en los contenidos de sodio, calcio, potasio, fósforo y magnesio, pues el análisis de varianza arroja para todos los parámetros, valores de probabilidad superiores a 0,10 (anexo 11).

El porcentaje de extracción de la materia orgánica del ácido húmico muestra una inestabilidad apreciable (tabla 2.11), pues presenta un elevado coeficiente de variación (55,99 %), y la tabla ANOVA (tabla 2.12) muestra que el tiempo y las condiciones de almacenamiento de la cachaza influyen significativamente sobre el rendimiento de extracción, para un 90 % de confianza, pues los valores de probabilidad para ambos factores son inferiores a 0,10.

Tabla 2.12. Tabla ANOVA para el % de extracción de MO en el AH, obtenido a partir de la cachaza

Efecto	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Fisher	Valor de probabilidad
Condiciones de almacenamiento	153,88	1	153,88	17,97	0,0038
Tiempo de almacenamiento	924,80	7	132,12	15,42	0,0009
Error	59,96	7	8,57		
Total	1138,64	15			

En la figura 2.9 se observa que se alcanzan mayores porcentajes de extracción de materia orgánica en el ácido húmico cuando la cachaza se almacena bajo techo, y en la semana tres, y luego se estabiliza en el tiempo. Es decir, a las tres semanas ocurre el proceso de descomposición máximo de la cachaza.

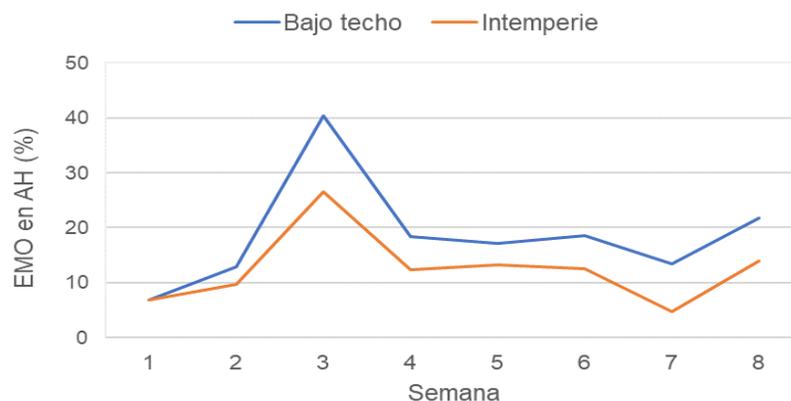


Figura 2.9. Comportamiento del % de EMO en el AH, a partir de la cachaza.

La autora considera que la alternativa de almacenamiento más adecuada para la cachaza es bajo techo, con un tiempo mínimo de recolección a las tres semanas, pues se alcanza un 40,33 % de extracción de materia orgánica en el ácido húmico.

2.4.3. Resultados para las condiciones de almacenamiento del estiércol de ganado vacuno

La humedad del estiércol de ganado vacuno presenta una elevada variabilidad en el periodo de estudio para las dos condiciones de almacenamiento (bajo techo e intemperie),

con coeficientes de variación iguales a 80,63 % y 50,51 % respectivamente (anexo 12 y resumen tabla 2.13) y un valor medio igual a 29,80 % y 41,67 % respectivamente.

El estiércol de ganado vacuno en el período estudiado presenta mayor contenido de humedad a partir de la semana 4 cuando se encuentra a la intemperie (figura 2.10), debido a las condiciones ambientales. Esto provoca que al utilizar la materia prima bajo estas condiciones se reduzca el gasto de agua en el proceso.

Tabla 2.13. Resumen de los resultados experimentales para las diferentes condiciones de almacenamiento del estiércol de ganado vacuno, durante ocho semanas.

Parámetro / Condición de almacenamiento	Bajo techo			Intemperie		
	Media	S	CV (%)	Media	S	CV (%)
MO (%)	75,98	3,41	4,49	74,43	3,68	4,95
Humedad (%)	29,80	24,03	80,63	41,67	24,80	50,51
Fósforo (mg/L)	0,82	0,09	10,69	0,85	0,10	11,65
Potasio (mg/L)	1,66	0,72	43,58	1,80	0,82	45,47
Sodio (mg/L)	0,41	0,11	28,00	0,50	0,26	51,54
Calcio (mg/L)	2,88	0,67	23,15	2,88	0,94	32,65
Magnesio (mg/L)	0,97	0,33	34,00	1,60	0,99	61,76
% EMO _{AH}	45,14	18,18	40,28	51,48	21,45	41,67

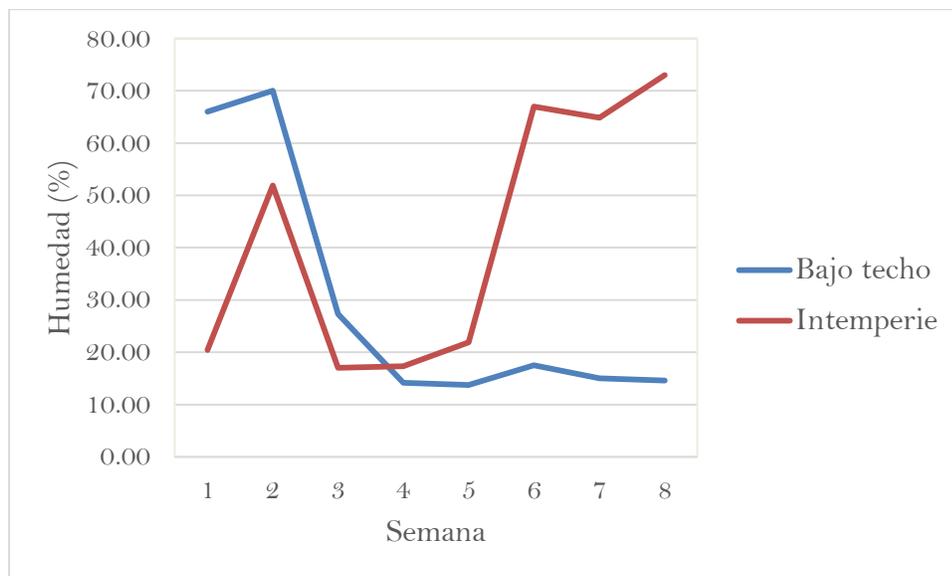


Figura 2.10. Comportamiento de la humedad del EGV para las condiciones de almacenamiento.

La materia orgánica del estiércol de ganado vacuno bajo techo y a la intemperie arroja un valor medio igual a 75,98 % y 74,43 % respectivamente, con estabilidad en el periodo. Estudios realizados por Kulikowska *et al.* (2015), muestran que un compost proveniente de estiércol de ganado vacuno, que presente un contenido de humedad superior a 47,9 % se debe fundamentalmente a las condiciones de almacenamiento de este residuo, así como a la alimentación que reciben los animales.

En la figura 2.11 se observa que en las semanas 3, 4, y 5 se alcanzan los máximos valores de contenido de materia orgánica en el estiércol de ganado vacuno para las dos condiciones de almacenamiento, lo que indica que en ese período se estabiliza el proceso de descomposición, con un coeficiente de variación de 4,63 % inferior al 12 % lo que demuestra que este parámetro no presenta una variabilidad significativa. A partir de la semana 6 se observa una disminución en el contenido de materia orgánica, lo cual se debe a que en el interior de la pila comienza a ocurrir un proceso anaeróbico formando ácidos y gases, como H₂S y CH₄ (Hernández *et al.*, 2012).

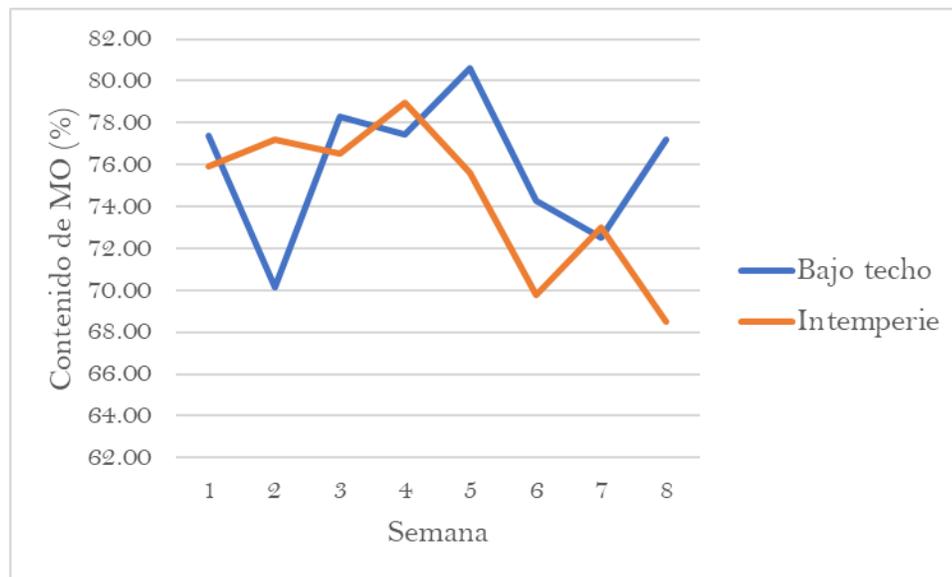


Figura 2.11. Comportamiento del contenido de materia orgánica del EGV respecto al tiempo

No existen diferencias significativas en los resultados obtenidos de los diferentes parámetros que caracterizan el estiércol de ganado vacuno (contenido de: materia orgánica, humedad, fósforo, potasio, sodio, calcio y magnesio), entre las condiciones y el tiempo de almacenamiento, pues las tablas ANOVA (anexo 13) arrojan valores de probabilidad mayores que 0,10.

El tiempo de almacenamiento influye significativamente, sobre el % de EMO en el AH, para un 90 % de confianza, pues el valor de probabilidad es inferior a 0,10 (0,0108) (tabla 2.14).

Tabla 2.14. Tabla ANOVA para el % de extracción de MO en el AH, obtenido a partir del estiércol de ganado vacuno, para el tiempo y las condiciones de almacenamiento.

Efecto	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Fisher	Valor de probabilidad
Condiciones de almacenamiento	161,1000	1	161,0000	1,59	0,2474
Tiempo de almacenamiento	48,2600	7	689,4370	6,81	0,0108
Error	708,3210	7	101,1890		
Total	5595,4810	15			

En la figura 2.12 se observa que el porcentaje de extracción de materia orgánica en el ácido húmico tiene un comportamiento inestable con respecto al tiempo, bajo techo y a la intemperie (coeficiente de variación igual a 40,28 % y 41,67 %). A partir de la semana 3 se observa un ascenso, pero se alcanza el mayor porcentaje en la semana 6. Esto se debe fundamentalmente a que ocurre el proceso de descomposición de la materia orgánica y que la materia prima alcanzó la etapa de maduración (Funes y Vázquez, 2016).

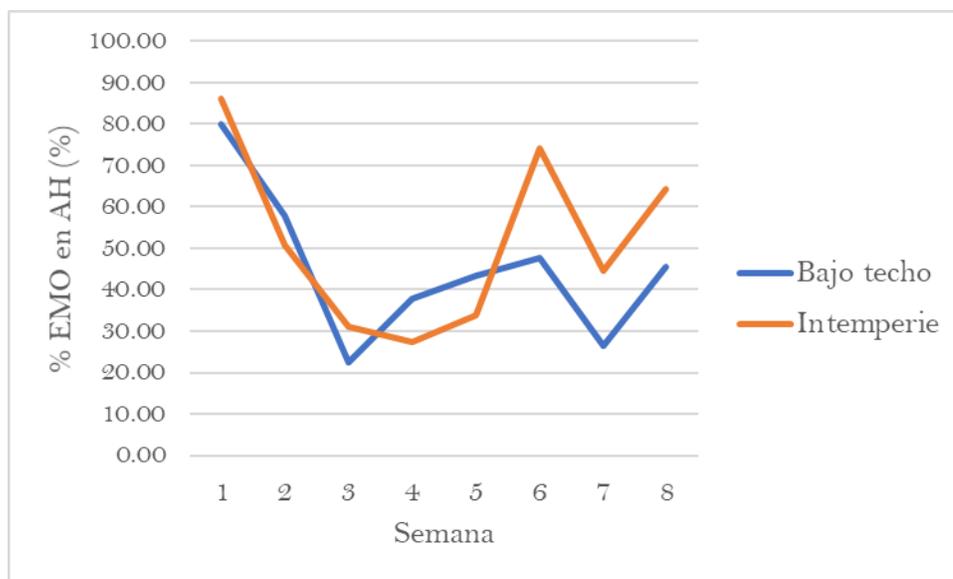


Figura 2.12. Comportamiento del % de extracción de MO en el AH, a partir del estiércol de ganado vacuno, durante 8 semanas, para las dos condiciones de almacenamiento.

A partir de esto se considera que no es necesario almacenar el estiércol de ganado vacuno en áreas techadas, y se debe recoger este residuo a las seis semanas, para su reutilización.

2.5. Selección del proceso de pretratamiento de las materias primas

En este epígrafe se estudian diferentes formas de pretratamiento de las materias primas seleccionadas (cachaza y estiércol de ganado vacuno), con el objetivo de evaluar su influencia en el proceso de extracción de ácido húmico.

2.5.1. Condiciones experimentales

Se planifica un diseño experimental unifactorial categórico, donde el factor es tipo de pretratamiento y la variable respuesta es el % de extracción de materia orgánica en el AH, el cual se calcula por la ecuación 2.4. Las variantes de pretratamiento que se estudian son:

- Trituración (T)
- Trituración y tamizado (TT)
- Materia prima sin tratamiento (ST)

En las variantes que se incluyen la etapa de tamizado se emplearon dos tamaños de partículas: 2 mm y 4 mm (Xu *et al.*, 2017).

Las condiciones para la extracción de las sustancias húmicas son las establecidas en el epígrafe 2.1, con el NaOH y el H₂SO₄, como extractantes básico y ácido respectivamente. Se establecen las condiciones óptimas operacionales definidas en la etapa 3.

2.5.2. Resultados del rendimiento de extracción de ácido húmico para los diferentes pretratamientos de la cachaza y el estiércol de ganado vacuno

El tipo de pretratamiento influye en el rendimiento de la extracción, para las dos materias primas (anexo 14), pues la tabla ANOVA arroja valores de probabilidad inferiores a 0,10, en ambos casos. La prueba Duncan (figura 2.13 y anexo 14), demuestra que para la cachaza sólo existe homogeneidad en el % de EMO_{AH}, entre los tratamientos T y TT 2 mm, donde

se obtienen los mayores rendimientos, 21,10 % y 21,21 % respectivamente. Como el proceso de triturado es menos costoso, se selecciona este pretratamiento para la cachaza.

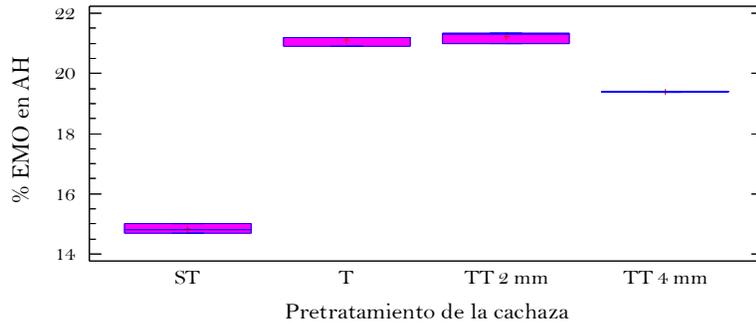


Figura 2.13. Comportamiento del % de extracción de MO en el AH, en dependencia del tipo de pretratamiento de la cachaza.

No existe homogeneidad en el rendimiento de extracción, entre los pretratamientos del estiércol de ganado vacuno (figura 2.13). El mayor % EMO_{AH} se obtiene cuando el estiércol de ganado vacuno no se trata, 20,01 % (anexo 7), por lo que no es necesario realizar tratamiento a esta materia prima. Esto se debe al tamaño de partícula de este residuo y sus características.

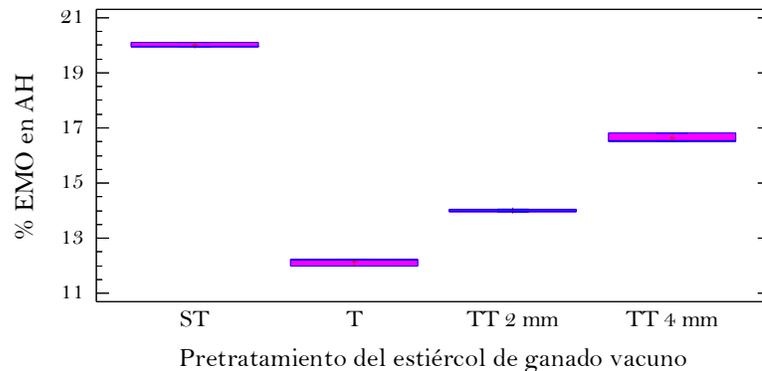


Figura 2.14. Comportamiento del % de extracción de MO en el AH, en dependencia del tipo de pretratamiento del estiércol de ganado vacuno.

2.6. Determinación de las operaciones de separación y fraccionamiento de las sustancias húmicas

En este epígrafe se definen las operaciones de separación para las etapas de separación y fraccionamiento de las sustancias húmicas.

2.6.1. Condiciones experimentales para la extracción del ácido húmico

El método de extracción de sustancias húmicas que se aplica es el propuesto por la Sociedad Internacional de Sustancias Húmicas Sun *et al.* (2020). Las condiciones para la extracción de las sustancias húmicas son las establecidas en el epígrafe 2.1, con el NaOH y el H₂SO₄, como extractantes básico y ácido respectivamente. Se define una relación S/L de 1/15 g/mL, y tiempos de cada extracción de 10 h.

Para el estudio de las etapas de separación y fraccionamiento de sustancias húmicas mediante las operaciones de centrifugación (C) y sedimentación (S), se planifica un diseño factorial categórico, donde el factor es la combinación de diferentes operaciones de separación (tabla 2.15).

Tabla 2.15 Combinaciones para la separación y fraccionamiento de sustancias húmicas, para las dos materias primas

Simbología	Separación de las sustancias húmicas	Fraccionamiento de las sustancias húmicas
S-S	Sedimentación	Sedimentación
S-C	Sedimentación	Centrifugación
C-S	Centrifugación	Sedimentación
C-C	Centrifugación	Centrifugación

Para la separación y el fraccionamiento de sustancias húmicas mediante centrifugación se utiliza una centrífuga de sedimentación por lotes de 300 mL *Heal Force* modelo *Neofuge 15*, mientras que la operación de sedimentación se realiza en probetas de 500 mL.

Las variables respuestas son:

- % de extracción de materia orgánica en las sustancias húmicas (% EMO_{SH}), el cual se calcula por la ecuación 2.22.
- % extracción de materia orgánica en el AH), el cual se calcula por la ecuación 2.4 (Fong *et al.*, 2007).

$$\% EMO_{SH} = \frac{X_{(MO)SH} m_{(SH)}}{X_{(MO)MP} m_{(MP)}} * 100 \quad (\text{ec. 2.22})$$

m_(MP): masa de materia prima, g

$m_{(SH)}$: masa de sustancias húmicas obtenida, g

$X_{(MO)MP}$: composición de materia orgánica en la materia prima

$X_{(MO)SH}$: composición de materia orgánica en las sustancias húmicas

La composición de materia orgánica de las sustancias húmicas se determina por un balance por componente en la etapa de extracción básica.

2.6.2. Resultados de las etapas de separación para la cachaza

Se obtiene mayor cantidad de sustancias húmicas (388,37 g) al aplicar la centrifugación (tabla 2.16). Sin embargo, no existe una diferencia apreciable en el % de extracción de materia orgánica en las sustancias húmicas entre las dos operaciones de separación, lo cual se considera puede estar determinado por la presencia de partículas que sedimentan bajo la acción de la fuerza centrífuga.

Tabla 2.16. Resultados de rendimiento obtenidos para las diferentes alternativas de operaciones de separación, a partir de cachaza como materia prima.

Métodos de separación	V_{SH} (g)	% EMO_{SH}	% EMO_{AH}
S-S	217,60	54,85	12,15
S-C			12,43
C-S	388,37	59,43	12,15
C-C			12,43

A partir de los resultados obtenidos se considera que, para la separación de sustancias húmicas, a partir de la cachaza se pueden utilizar ambas operaciones.

En la etapa de fraccionamiento de las sustancias húmicas, la extracción es ligeramente superior mediante la centrifugación, pues existen partículas disueltas en el AF que solo sedimentan bajo la acción de la fuerza centrífuga (Zhang *et al.*, 2018).

2.6.3. Resultados para el estiércol de ganado vacuno

El porcentaje de extracción de materia orgánica en las sustancias húmicas resulta superior al separar mediante centrifugación (tabla 2.17), lo cual es similar a los resultados obtenidos para la cachaza.

A diferencia de los resultados que se obtienen para la cachaza, el ácido húmico no sedimenta para estas condiciones, por lo que no se valora dicha técnica para el fraccionamiento de sustancias húmicas a partir del estiércol.

Tabla 2.17. Resultados de rendimiento obtenidos para las diferentes alternativas de operaciones de separación, a partir de estiércol de ganado vacuno como materia prima.

Alternativas	V _{SH} (g)	% EMO _{SH}	% EMO _{AH}
S-S	212,34	33,78	-
S-C			27,04
C-S	332,7	44,20	-
C-C			27,04

A partir de los resultados obtenido se selecciona la sedimentación para la etapa de separación de las sustancias húmicas para ambas materias primas, y para la etapa de fraccionamiento la sedimentación para la cachaza, y la centrifugación para el estiércol de ganado vacuno.

2.7. Caracterización del producto final

El ácido húmico obtenido a las condiciones óptimas de extracción, y de almacenamiento de las materias primas seleccionadas, se caracteriza, a partir de un análisis elemental, de micro y macro nutrientes y de espectrofotometría infrarrojo.

2.7.1. Métodos empleados para la caracterización

Los análisis de C, H y N se realizan en los Servicios de Apoyo a la Investigación (SAI) de la Universidad de La Coruña. El análisis se basa en la combustión dinámica de la muestra (*FlashEA1112, ThermoFinnigan*). La muestra se pesa en una cápsula de estaño (balanza

MX5, Mettler-Toledo) y se introduce en un reactor de cuarzo lleno de WO₃ y cobre y calentado a 1020°C. La mezcla de gases de combustión es transportada por un flujo de helio a una capa de WO₃ para lograr una oxidación cuantitativa completa, seguida de un paso de reducción en una capa de cobre para reducir los óxidos de nitrógeno y SO₃ a N₂ y SO₂. Los componentes resultantes, N₂, CO₂, H₂O y SO₂ son separados en una columna cromatográfica (*Porapak 2m*) y detectados por un detector de conductividad térmica.

El análisis de micro y macroelementos se realiza en el Laboratorio Provincial de Suelos de Matanzas, a partir de las siguientes técnicas analíticas:

- Contenido de P: se determina por el método colorimétrico con lectura en un fotómetro de llama.
- Contenido de Na y K: se aplica el método Espectrofotométrico.
- Contenido de Ca: por volumetría, con el indicador Murexida y se valora con solución 0,02 N de EDTA.
- Contenido de Mg: por volumetría, con el indicador Eriocromo negro T y se valora con solución EDTA.

La espectrofotometría infrarroja se realiza en un equipo FTIR IRAffinity-1S WL de la marca Shimadzu, y la medida está hecha con un accesorio ATR con cristal de ZnSe. Por ello, la muestra se presenta sin preparación en pastilla, sólo con una molienda en mortero de mano de ágata.

2.7.2. Resultados de la caracterización del ácido húmico, a partir de la cachaza y del estiércol de ganado vacuno

El ácido húmico obtenido partir de la cachaza y el estiércol de ganado vacuno presenta contenidos de materia orgánica de 60,30 % y 60,71 %, superiores a los obtenidos por (Zularisam *et al.*, 2017), que fue de 37,2 %. Este componente es de vital importante para el suelo, por la pérdida apreciable que presenta el mismo, por el uso intensivo e indiscriminado de fertilizantes nitrogenados (Suddarth *et al.*, 2019).

La composición elemental de los dos productos es similar, en cuanto al contenido de carbono, hidrógeno y nitrógeno (tabla 2.18). Son similares al del ácido húmico obtenido a partir de compost por (Chandan *et al.*, 2016), iguales a 51,48 %, 51,3 % y 3,38 %

respectivamente. Las relaciones H/C y N/C se encuentran dentro de los intervalos establecidos en bibliografías clásicas de sustancias húmicas (Steelink, 1985; Tan, 1998; Thurman, 1985). Estas relaciones demuestran que los productos son ricos en materia orgánica, con bajo nivel de carbonización, según estudios realizados por (Amir *et al.*, 2004).

Tabla 2.18. Composición elemental del producto, para cada materia prima.

Producto	Composición elemental (%)			H/C	N/C
	C	H	N		
AH _{cachaza}	52,23	5,49	3,58	1,26	0,059
AH _{EGV}	51,31	5,13	3,44	1,20	0,057
Literatura clásica	45-55	2-6	2.8-4.6	1-1,30	0,03-0.06

(Amir *et al.*, 2004) plantea que estas relaciones de C/N y C/H se deben a que las materias primas utilizadas (cachaza y estiércol) son ricas en materia orgánica, con bajo nivel de carbonización.

Los contenidos de fósforo, potasio y sodio (tabla 2.19) son similares a los reportados por (Funes y Vázquez, 2016) en un estudio de un biofertilizante obtenido.

Tabla 2.19. Análisis micro y macro elementos del producto para las dos materias primas.

Producto	Análisis micro y macro elementos (mg/L)				
	P	K	Na	Ca	Mg
AH _{cachaza}	0,16	1,27	0,52	4,56	3,42
AH _{EGV}	0,49	1,53	0,33	5,26	4,14

Según (Funes y Vázquez, 2016) el fósforo es particularmente importante para el desarrollo radicular, crecimiento temprano de brotes, incremento de la productividad temprana y la extensión de los entrenudos en las plantas.

El potasio (K) es un nutriente vital para que las plantas realicen el proceso de fotosíntesis presentando gran interés en procesos metabólicos. El mismo no puede ser reemplazado por ningún otro nutriente debido a que cuando hay deficiencia de éste, las funciones vitales en las plantas son afectadas. Según Constantino *et al.* (2021) el potasio interviene en la

regulación del potencial osmótico de las células vegetales, en enzimas implicadas en la respiración y fotosíntesis. Este nutriente es absorbido por la planta como ion K^+ . Es un activador de enzimas en las raíces de las plantas, produce un gradiente de presión osmótica que lleva el agua dentro de la misma y es una fuente de incremento de proteínas en los cultivos.

Según (De Oliveira *et al.*, 2016) el magnesio es un mineral constituyente de la clorofila de las plantas, participa en el proceso de fotosíntesis, además de formar parte del metabolismo de los fosfatos, en la respiración de la planta y en numerosos procesos enzimáticos.

(Calvo *et al.*, 2014) expone que el calcio contribuye a la fertilidad del suelo ya que desplaza al hidrógeno (H^+) presente en la superficie de las partículas de arcilla, disminuyendo de esta manera la acidez e interviene en la absorción de otros nutrientes por las raíces como por ejemplo en la traslocación de la planta.

El contenido de sodio en los fertilizantes orgánicos (AH) proporciona mejor crecimiento y nutrición en las plantas, es usado en la síntesis de clorofila y puede ser empleado como sustituto parcial del potasio (Susic, 2016).

Los espectros de IRTF de los dos ácidos húmicos obtenidos (anexo 15) revelaron la presencia de bandas de absorción muy similares, independientemente de su fuente, con pequeñas diferencias en la intensidad y desplazamientos de los picos.

Esto permite proponer la presencia de los mismos grupos funcionales principales. Existe presencia de los alcoholes y ácidos carboxílicos ($1300-1050\text{ cm}^{-1}$ de C-O), así como del grupo carbonilo $-C=O$ ($1650 - 1750\text{ cm}^{-1}$), confirmando la acidez de este producto. Se observa la presencia del grupo OH^- ($3650-3100\text{ cm}^{-1}$), con más intensidad en el ácido húmico obtenido a partir de la cachaza, por las características de esta materia prima. También existe un aumento de la señal C-O de los alcoholes y ácidos carboxílicos ($1300-1000\text{ cm}^{-1}$ de C-O), lo que se relaciona con su acidez. Se debe destacar que apenas se logra observar la señal de las cadenas alifáticas ($2970-2850\text{ cm}^{-1}$ C-H alcanos y CH_3), ni presencia de grupos aromáticos, lo cual coincide con los obtenidos por (Villagrán *et al.*, 2020)

2.8. Conclusiones del capítulo

1. La metodología de extracción de sustancias húmicas que mejor se ajusta a la disponibilidad de materias primas cubanas, es la combinación de extractantes hidróxido de sodio - ácido sulfúrico.
2. Las fuentes de sustancias húmicas que aportan un mayor rendimiento de extracción son el estiércol de ganado vacuno y la cachaza, ambos son residuos con elevado contenido de materia orgánica y con disponibilidad.
3. Las condiciones óptimas de extracción de ácido húmico a partir de la cachaza son: 0,12 g/ml de relación sólido – líquido y un tiempo de extracción de cada etapa de 10 horas, para un rendimiento de 15,72%.
4. Las condiciones óptimas de extracción de ácido húmico, a partir del estiércol de ganado vacuno son: 0,10 g/ml de relación sólido – líquido y un tiempo de extracción de cada etapa de 10 y 13 horas respectivamente, para un rendimiento de 27.19%.
5. Las condiciones de almacenamiento de la cachaza requieren de un área techada y de un proceso de trituración a las tres semanas; mientras que el estiércol de ganado vacuno se puede almacenar a la intemperie y no requiere pretratamiento, con un tiempo de almacenamiento mínimo de seis semanas.
6. Para la extracción de ácido húmico a partir de la cachaza, se separan y fraccionan las sustancias húmicas por sedimentación; mientras que para el estiércol de ganado vacuno ocurre la separación por sedimentación y el fraccionamiento por centrifugación.
7. La caracterización química del ácido húmico obtenido partir de la cachaza y el estiércol de ganado vacuno, arroja que las materias primas utilizadas son ricas en materia orgánica, con bajo nivel de carbonización.
8. Los ácidos húmicos obtenidos tienen la presencia de grupos carbonilos, hidroxilos y carboxilos, lo que corrobora la acidez de este producto.

CAPÍTULO 3. ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS DE PRODUCCIÓN DE ÁCIDO HÚMICO, A PARTIR DE CACHAZA Y ESTIÉRCOL DE GANADO VACUNO

En este capítulo se evalúan las alternativas tecnológicas para producir ácido húmico, a partir de dos materias primas, la cachaza y el estiércol de ganado vacuno, y en diferentes macrolocalizaciones de las plantas. Se propone el diagrama de flujo detallado, se realiza un diseño preliminar de los equipos involucrados y se analiza la factibilidad económica de cada alternativa tecnológica. Se tiene en cuenta la siguiente metodología (figura 3.1) para el diseño y síntesis de las diferentes alternativas tecnológicas, a partir de criterios establecidos por Douglas (1998) y Turton *et al.* (2018).

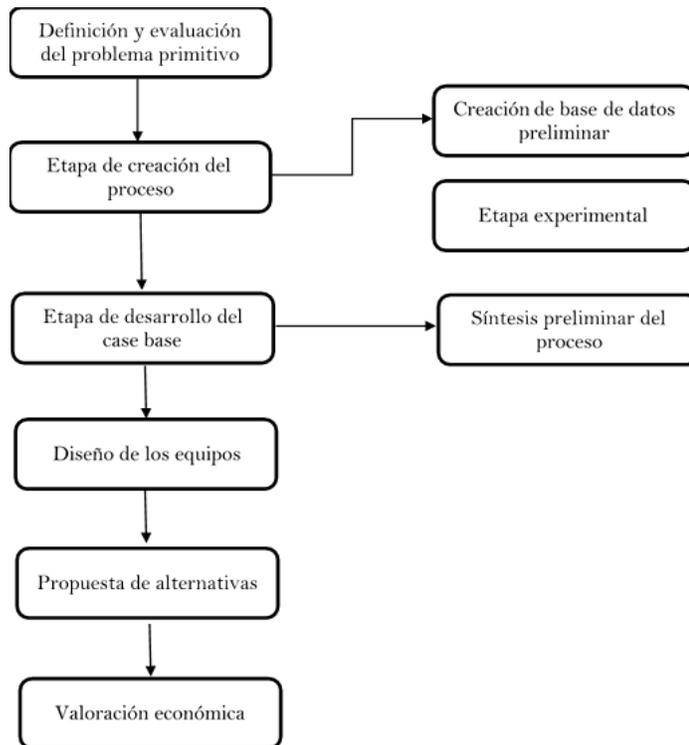


Figura 3.1. Metodología para el diseño y síntesis de las diferentes alternativas tecnológicas de producción de ácido húmico

3.1. Definición y evaluación del problema primitivo

El proceso de síntesis y diseño de un proceso químico inicia con un problema primitivo que plantea una necesidad a satisfacer. La definición del problema primitivo del diseño del proceso parte de la necesidad que existe en la provincia de Matanzas de satisfacer la demanda de fertilizantes orgánicos.

A partir del problema primitivo planteado, teniendo en cuenta las condiciones existentes en Cuba y la información encontrada en la búsqueda bibliográfica, se definen las siguientes alternativas de solución de dicho problema:

1. Adquirir el ácido húmico en el mercado internacional
2. Producir el ácido húmico en Cuba

La adquisición del ácido húmico en el mercado internacional debe de ser sopesado en comparación con la variante de producirlo, siempre que se quiera satisfacer una necesidad. Sin embargo, debido a los precios tan altos que tienen estos productos en el mercado internacional y que el país se encuentra inmerso en la sustitución de importaciones, se descarta esta solución y se define como propuesta la producción nacional de ácido húmico. Además, se utilizarán como materias primas residuos de la industria agropecuaria.

3.2. Etapa de creación del proceso

En la etapa de creación del nuevo proceso se necesita crear una base de datos preliminar con información relativa al proceso, como son las características y precios de los reactivos, productos y subproductos del proceso, así como la demanda de fertilizante orgánico en la provincia.

3.2.1. Base de datos preliminar

Investigaciones realizadas en Cuba permiten dosificar la aplicación de abono orgánico al suelo, los cuales estimulan el crecimiento vegetal, adelantan el ciclo vegetativo, aumentan el rendimiento, aumentan la calidad de los frutos e incrementan la actividad microbiana del suelo. Por tales razones se aplican a la mayoría de los cultivos entre los que se pueden

mencionar: el plátano (fruta, macho, burro), raíces y tubérculos (papa y boniato), granos (arroz y maíz), viveros de frutales (fruta bomba, guayaba, de forma general), plantas ornamentales (plantas de flores y otras plantas de interiores y exteriores) y hortalizas (tomate, ají Chay, pimiento, cebolla, lechuga, etc.) (Funes y Vázquez, 2016).

En esta investigación se proponen alternativas de producción para obtener ácido húmico, que pueda aplicarse en cultivos de hortalizas.

La producción de hortalizas y condimentos frescos representa el subprograma distintivo en el Programa Nacional de la Agricultura Urbana, Suburbana y Familiar. Su base productiva al cierre del año 2021 estaba conformada por más de 8 634 ha (68 340 000 m²), representadas por las modalidades principales: organopónicos, huertos intensivos y semiprotegidos. En la provincia de Matanzas el cultivo de hortalizas se distribuye como muestra la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Distribución del cultivo de hortalizas

Modalidades	Total	Área bruta
Organopónicos	317	145,4 ha (1 454 000 m ²)
Huertos intensivos	298	11,7 ha (117 000 m ²)
Huertos semiprotegidos	18	575,5 ha (5 575 000 m ²)
Total	633	732,6 ha (7 326 000 m ²)

Según tabla 3.2, para los cultivos de organopónicos (hortalizas menores) la dosis de abono orgánico que se incorpora al suelo es de 0,6 kg de estiércol /m², por 6 rotaciones al año (MINAGRI, 2021). El consumo de abono orgánico para la modalidad de organopónicos se calcula a partir de las hectáreas a tratar, las dosis de estiércol a aplicar y de las rotaciones anuales, obteniéndose una demanda de 5 234 400 kg/a. Considerando el contenido de materia orgánico del estiércol de ganado vacuno, la demanda de ácido húmico es de 4 082 832 kg/a.

Tabla 3.2. Dosificación de abono orgánico

Hortalizas	Dosis
Tomate	4 – 8 kg/m ² (en siembra)
Ají Chay	4 kg/m ²
Pimiento	4 – 8 kg/m ²
Cebolla	4 kg/m ²
Hortalizas menores (lechuga, rábano, cebollinos, etc.)	0,6 kg/m ² (en canteros alternos)
Fuente: (Funes y Vázquez, 2016)	

Para el caso en estudio se pretende diseñar alternativas para la producción de ácido húmico con el fin de evaluar si el proceso es factible técnico y económicamente.

3.2.2. Disponibilidad de las materias primas

El estiércol de ganado vacuno se recolecta en las seis U.E.B de la Empresa Pecuaria Genética ubicada en la provincia de Matanzas, de forma aleatoria (anexo 16). El anexo 17 muestra los tipos de unidades que conforman la empresa y la cantidad de cabezas de ganado en las distintas clasificaciones distribuidas en todas las U.E.B pertenecientes a la empresa, respectivamente. Esta información permite conocer la cantidad de unidades y su estado actual, se debe aclarar que cuando se refiere a vaquerías típicas de 120 y 288 es la capacidad máxima de ganado vacuno que pueden albergar. Se debe aclarar que los números 2; 4; 5; 6; 7; 8 se refieren a los nombres de las U.E.B las cuáles se nombran San Francisco, Triunvirato, Super Vaca, Majagua, Gonzáles y La Prueba, respectivamente.

Mediante estudios realizados en la empresa, que demuestran que una vaca excreta en un año alrededor de 13 400 kg, además, se considera a la vaca como una Unidad de Ganado Mayor (UGM), se calcula la cantidad de estiércol teniendo en cuenta las distintas clasificaciones de ganado como la cantidad de horas en nave (5 horas) que son las que se pueden contabilizar. Una Unidad de Ganado Mayor (UGM) es una unidad convencional que considera una vaca de 500 kg de peso vivo.

La tabla 3 del anexo 17 proporciona lo que representan las diferentes clasificaciones de ganado vacuno respecto a una UGM. Así se puede conocer la cantidad de estiércol producida (EP) por una UGM en las 5 horas de nave al día.

Una UGM como promedio excreta en una hora 1,53 kg de estiércol, mientras que para la 5 horas de nave alrededor de 7,65 kg, entonces las 19 663 UGM con las que se cuentan (anexo 18) producirán en el rango de los 150 421,95 kg de estiércol diario, se debe mencionar que estos valores pueden tener variación debido que dependen de factores como la alimentación o el tiempo de nave que puede variar.

Para el caso de cachaza, según datos del grupo AZCUBA, en la provincia existe una disponibilidad de 605 641,6 kg/día, se debe señalar, que con esta materia prima solo se contará en un periodo del año.

3.2.3. Resultados de la etapa experimental

La etapa de experimentación es muy importante para lograr una correcta síntesis del proceso. En el capítulo anterior se describe de forma detallada esta etapa y los principales resultados se resumen en la tabla 3.3.

Tabla 3.3. Resumen de los resultados experimentales, relacionados con el proceso

Aspectos	Cachaza	Estiércol de ganado vacuno
Metodología de extracción de AH	La combinación de NaOH (0,5 mol/L) y H ₂ SO ₄ (6 mol/L), como extractantes básico y ácido respectivamente	
Condiciones de almacenamiento de las materias primas	Almacenar en áreas techadas durante 3 semanas	Almacenar a la intemperie, como mínimo 6 semanas.
Pretratamiento de la materia prima	Triturar	No es necesario
Condiciones operacionales	S/L = 0,07 g/ml t _{EB} = 10 h t _{EA} = 10 h	S/L = 0,07 g/ml t _{EB} = 10 h t _{EA} = 13 h

3.3. Desarrollo del caso

Para proceder a realizar la síntesis preliminar del proceso se deben definir las siguientes etapas (Turton *et al.*, 2018): tipo de proceso, definición del estado químico y las operaciones del proceso.

3.3.1. Definición del tipo de proceso

La autora define el proceso de producción de ácido húmico como discontinuo o *Batch*. Es conocido que los procesos que poseen un bajo volumen de producción, así como aquellos destinados a cubrir una demanda de producto intermitente o que permiten obtener productos tóxicos y perjudiciales, son generalmente discontinuos, como por ejemplo la fabricación de materiales farmacéuticos y la producción de elementos electrónicos.

Márquez (2003) plantea que un sistema continuo debe tener flujos mayores que 5000 t/a. La demanda de este proceso es de 4 082,832 t/a, por lo que no cumple con lo planteado, además consta de dos etapas de extracción con tiempo largo de residencia.

3.3.2. Definición del estado químico

En este paso se definen las especificaciones de la materia prima y del producto deseado, lo que permite realizar la definición específica del problema de síntesis. En el anexo 18 se muestran las especificaciones de: la cachaza, el estiércol de ganado vacuno, el agua, el hidróxido de sodio, el ácido sulfúrico, y del AH, AF y H.

3.3.3. Operaciones del proceso

En el proceso de síntesis y diseño preliminar se utilizan las siguientes operaciones unitarias: lixiviación, separaciones de compuestos químicos, mezclado o división de corrientes y separación de fases. La selección de las operaciones del proceso para convertir a la materia prima en producto se realiza a partir de la eliminación de una o más diferencias de propiedades.

- Eliminación de las diferencias de tipo molecular

En este punto deben considerarse todas las alternativas posibles para convertir las materias primas en productos (tabla 3.4), en este caso se tienen dos alternativas o caso estudio.

Para eliminar las diferencias de tipo molecular se determinó en el capítulo 2 el beneficio bruto (BB) por kg de ácido húmico a producir, a partir de los precios unitarios de la materia prima, los materiales auxiliares y el producto (ácido húmico), no se considera la venta del ácido fúlvico ni la humina como subproductos.

El beneficio bruto para las dos alternativas, A y B, es positivo (11,19 y 11,37 \$/kg AH), por lo que se continúa con el proceso de síntesis.

Tabla 3.4. Alternativas para producir ácido húmico

Alternativas	Materia prima utilizada
A	Cachaza
B	Estiércol de ganado vacuno

- Distribución de los compuestos químicos

En este paso se introducen las operaciones de mezclado y división de flujo para eliminar las diferencias en las razones de flujo. Según los resultados experimentales obtenidos en el capítulo 2 son: extracción básica y extracción ácida. Cuando se utiliza cachaza (Alternativa A) es necesario una etapa de pretratamiento de trituración.

En la extracción básica con hidróxido de sodio diluido ocurre la extracción de las sustancias húmicas (SH) por sobrenadante y la humina (H) por precipitado a partir de las dos materias primas. Mediante un balance de masa de la materia orgánica se determina la extracción a partir de la ecuación 3.1.

$$m_{MP} * X_{(MO)MP} + m_{NaOH} * X_{(MO)NaOH} = m_{SH} * X_{(MO)SH} + m_H * X_{(MO)H} \quad (\text{ec. 3.1})$$

Donde:

m_{MP} : masa de materia prima, g

$X_{(MO)MP}$: composición de materia orgánica en la materia prima

m_{NaOH} : masa de hidróxido de sodio, g

$X_{(MO)NaOH}$: composición de materia orgánica en el hidróxido de sodio (0)

m_{SH} : masa de sustancias húmicas, g

$X_{(MO)SH}$: composición de materia orgánica en las sustancias húmicas

m_H : masa de humina, g

$X_{(MO)H}$: composición de materia orgánica en la humina

En la extracción ácida con ácido sulfúrico diluido ocurre la extracción del ácido húmico (AH) por precipitado y el ácido fúlvico (AF) por sobrenadante presente en las sustancias húmicas (SH). Mediante un balance de masa de la materia orgánica se determina la extracción a partir de la ecuación 3.2.

$$m_{SH} * X_{(MO)SH} + m_{H2SO4} * X_{(MO)H2SO4} = m_{AH} * X_{(MO)AH} + m_{AF} * X_{(MO)AF} \quad (\text{ec. 3.2})$$

Donde:

$m_{H_2SO_4}$: masa de ácido sulfúrico, g

$X_{(MO)H_2SO_4}$: composición de materia orgánica en el ácido sulfúrico (0)

m_{AH} : masa de ácido húmico, g

$X_{(MO)AH}$: composición de materia orgánica en el ácido húmico

m_{AF} : masa de ácido fúlvico, g

$X_{(MO)AF}$: composición de materia orgánica en el ácido fúlvico

- Eliminación de las diferencias en composición

Para eliminar las diferencias en composición entre las diferentes corrientes se introducen las operaciones de separación necesarias para obtener el producto deseado. Cuando se utiliza cachaza (Alternativa A) es necesario una etapa de pretratamiento de trituración de esta materia prima.

Para las etapas de separación y fraccionamiento de las sustancias húmicas, según los resultados obtenidos en la etapa experimental, se estudian diferentes operaciones de separación. Para la cachaza (alternativa A), tanto en la extracción básica como en la ácida se estudia sedimentación, mientras para el estiércol de ganado vacuno (alternativa B) solo se utiliza sedimentación en la extracción básica y centrifugación en la ácida.

- Eliminación de las diferencias de temperatura, presión y fase

En el proceso de obtención de ácido húmico no existen diferencias de temperatura ni de presión, pues todas las operaciones ocurren a temperatura y presión, 27 °C y 1 atm respectivamente.

En cuanto a las diferencias de fases, en la extracción básica es necesario la operación de mezclado para homogenizar la mezcla del extractante empleado hidróxido de sodio y el estiércol de ganado vacuno obteniéndose una suspensión. Posterior a la extracción la fracción sólida (H) se obtiene como precipitado y constituye el subproducto del proceso y la fracción líquida (SH) se obtiene como sobrenadante y continúa en el proceso para la extracción ácida. El producto obtenido en la extracción básica (SH) es sometido a una extracción ácida con una disolución de ácido sulfúrico ocurriendo una suspensión. Posterior a la extracción la fracción líquida (AF) se obtiene como sobrenadante

constituyendo el subproducto del proceso y la fracción sólida (AH) se obtiene como precipitado y constituye el producto final del proceso.

- Tareas de integración: combinar las operaciones en procesos unitarios

En este paso se disponen los equipos que conformarán el proceso de obtención del ácido húmico, para cada alternativa tecnológica (anexo 19).

Los anexos 20 y 21 muestran los diagramas de flujo, para cada alternativa.

3.4. Diseño de los equipos involucrados en el proceso

El diseño de los equipos se realiza con el fin de estimar el costo de la planta. La selección de los materiales se lleva a cabo teniendo en cuenta las características de corrosión de los materiales de construcción, la temperatura y presión a la que se desarrolla el proceso.

3.4.1. Diseño de los tanques de almacenamiento

La selección de los materiales se lleva a cabo teniendo en cuenta las características de corrosión de los materiales de construcción, la temperatura y presión a la que se desarrolla el proceso. Atendiendo a la corrosión se selecciona acero al carbono como el material más apropiado para el hidróxido de sodio a 27°C y 1 atm según tabla 7.9 (Turton *et al.*, 2018), debido a que es un material común y de bajo costo, sin embargo, para el ácido sulfúrico en disolución es inaceptable. Tanto Turton *et al.* (2018) como Perry y Green (2008) plantean que para el ácido sulfúrico en disolución se puede utilizar el acero inoxidable 316. Los tanques de almacenamiento de agua y humina también se construyen de acero al carbono, pues este material es aceptable para sustancias básicas a las condiciones de operación de la planta, en cuanto al AH y AF se almacenan en tanques de acero inoxidable 316 material resistente a los ácidos orgánicos (Turton *et al.*, 2018).

Para ambas metodologías se diseñan los mismos tanques de almacenamiento. Para ello, se necesita conocer el tiempo de cobertura de las sustancias a almacenar y así determinar el volumen de dichos tanques a través de la ecuación 3.5.

$$V = \frac{q*t}{0,9} \quad (\text{ec. 3.5})$$

Donde

V: volumen de los tanques (m^3)

q: flujo volumétrico de cada corriente (m^3/h)

t: tiempo de cobertura (h)

0,9: es el factor de llenado según la Heurística 5 tabla 11.7 (Turton *et al.*, 2018)

La planta cuenta con seis tanques de almacenamiento con tiempos de cobertura diferentes. Los tanques destinados a los materiales auxiliares (NaOH diluido a 0,5 mol/L y H₂SO₄ diluido a 6 mol/L) se diseñan para un tiempo de cobertura de 1 mes porque solo se emplean en pequeñas proporciones, para los tanques de agua, producto (AH) y subproducto (AF) se diseñan para un tiempo de cobertura de 7 días y para el tanque de humina se estima un tiempo de cobertura de 30 días, pero depende de la conexión de los horarios del equipo de transporte como se indica en la heurística 6 para tanques de almacenamiento (Walas, 2010).

Los flujos de hidróxido de sodio, agua, humina, ácido sulfúrico, ácido fúlvico y ácido húmico, se determinan a partir de los modelos matemáticos (tablas 2.9 y 2.10) que permiten calcular las cantidades consumidas y/o producidas, para las condiciones operacionales establecidas para cada materia prima, y teniendo en cuenta la demanda de ácido húmico.

Las dimensiones de los tanques de almacenamiento se determinan a partir de la heurística 4 tabla 11.6 para tanques de almacenamiento (Turton *et al.*, 2018), que plantea que la altura del tanque es tres veces su diámetro.

Para la alternativa A (materia prima la cachaza) los tanques con mayor volumen son los destinados a almacenar el ácido fúlvico y el agua (tabla 3.5), esto es debido a que el agua se emplea con mayor frecuencia para preparar la disolución de NaOH a la concentración de 0,5 mol/L y de ácido sulfúrico a la concentración 6 mol/L, además de la adicional que es necesaria para lograr la relación sólido-líquido requerida, y en la etapa de fraccionamiento de las sustancias húmicas (extracción ácida), se obtiene mayor cantidad de sobrenadante (ácido fúlvico).

Para la alternativa B (materia prima estiércol de ganado vacuno), el tanque con mayor capacidad es el de almacenamiento del ácido húmico (tabla 3.5), pues se logra mayores producciones del producto final.

Tabla 3.5. Especificaciones de los tanques de almacenamiento, para cada alternativa

Tanque de almacenamiento	Alternativa A (Cachaza)			Alternativa B (Estiércol de ganado vacuno)		
	Volumen (m ³)	Diámetro (m)	Altura (m)	Volumen (m ³)	Diámetro (m)	Altura (m)
Hidróxido de sodio	2,74	1,05	3,15	0,92	0,73	2,20
Humina	29,04	2,29	6,87	14,55	1,82	5,47
Agua	95,29	3,39	10,17	0,07	0,32	0,95
Ácido sulfúrico	2,40	1,01	3,02	0,81	0,70	2,11
Ácido fúlvico	113,45	3,59	10,78	21,61	2,08	6,23
Ácido húmico	73,51	3,11	9,34	73,51	3,11	9,34

Walas (2010) plantea en la heurística 1 que para tanques de capacidad menor a 1000 gal (3,78m³) se usan tanques verticales sobre patas y para los tanques que contienen una capacidad mayor que 1000 gal (3,78 m³) se usan tanques horizontales en soportes de concretos según la heurística 2. En la tabla 3.6 se muestra el tipo de tanque para cada alternativa

Tabla 3.6. Tipo de tanque de almacenamiento para cada alternativa

Tanque de almacenamiento	Alternativa A	Alternativa B
Hidróxido de sodio	Vertical sobre patas	Vertical sobre patas
Humina	Horizontal en soportes de concretos	Horizontal en soportes de concretos
Agua	Horizontal en soportes de concretos	Vertical sobre patas
Ácido sulfúrico	Vertical sobre patas	Vertical sobre patas
Ácido fúlvico	Horizontal en soportes de concretos	Horizontal en soportes de concretos
Ácido húmico	Horizontal en soportes de concretos	Horizontal en soportes de concretos

3.4.2. Diseño del tanque de mezclado con agitación

Se diseña un tanque de mezclado para cada alternativa.

La capacidad del tanque se determina por la ecuación 3.6.

$$C = Q * t_r \quad (\text{ec. 3.6})$$

Donde:

C: capacidad del tanque (m³)

Q: flujo volumétrico (m³/h)

t_r: tiempo de residencia (h)

El diámetro del tanque se determina usando la relación L/D y la geometría del mismo, ecuación 3.7.

$$C = \frac{\pi}{4} * D^2 * L \quad (\text{ec.3.7})$$

Donde:

D: diámetro del tanque (m)

L: altura del fluido (m)

Para el cálculo de las dimensiones del tanque se considera (Ulrich., 1985):

- La altura del líquido es 1,25 veces el diámetro del tanque (L = 1,25D)
- La altura del tanque es 1,7 veces el diámetro del tanque (H = 1,7D)

Según la heurística 6 (Turton *et al.*, 2018) para agitación y mezclado en suspensiones sólidas se puede utilizar tanto agitadores de propela como de turbina, para agitación intensa con velocidad superior a 0,15 ft/s (0,05 m/s) se recomienda agitadores de propela.

Para el diseño de las características del agitador se realiza un escalado a partir del agitador propuesto por Saito y Seckler (2014) para el mismo proceso productivo y bajo las mismas características de producción, a partir de la metodología propuesta por Rosabal y Valle (2006) (anexo 22).

La tabla 3.7 muestra los datos para el diseño de los tanques de agitación para cada alternativa.

Para ambas alternativas se selecciona un agitador del tipo propela marina (hélice) con tabiques verticales porque son agitadores baratos que consumen poca energía y dan buen resultado cuando se agitan líquidos poco viscosos (menos de 4000 cP) o cuando se agitan grandes volúmenes de líquidos, para lo cual se pueden utilizar varios rodetes instalados en el mismo eje o en posición horizontal o inclinada. También se emplean para producir suspensiones de contenido de sólido de hasta un 50 % en masa, además trabaja a altas

velocidades de rotación entre 300-1000 rev/min. La principal ventaja de estos agitadores es la ausencia de la necesidad del uso de reductores debido a que se pueden conectar directamente al eje de un rotor (Rosabal y Valle, 2006)

Tabla 3.7. Datos para el diseño de los tanques de agitación para cada alternativa

Datos	Alternativa A	Alternativa B
ρ_{MP} (kg/m ³)	1795,86	1686,00
ρ_{H_2O} (kg/m ³)	995,00	995,00
X	0,069	0,071
m(MP) _{total} (kg/h)	525,50	154,02
Q (m ³ /h)	0,29	0,09
t _r (h)	10,00	10,00
n (rev/s)	6,66	6,66
u H ₂ O (Pa s)	0,001	0,001
K _n	0,64	0,68

En este caso la suspensión es poco viscosa (0,01Pa s) y presenta bajo contenido de sólidos (6,9 y 7,1 %) (tabla 3.7), valores que corresponden con las propiedades de los agitadores de propela marina.

Tabla 3.8. Parámetros de diseño del tanque de mezclado con agitación, para cada alternativa.

Parámetros de diseño	Alternativa A	Alternativa B
Capacidad (m ³)	2,926	0,914
Diámetro (m)	1,075	0,729
L (m)	3,225	2,188
Re _m	560406,242	351467,848
ρ_s (kg/m ³)	1026,600	1024,984
Ø	0,039	0,043
u _s (Pa s)	0,001	0,001
diámetro agitador (m)	0,301	0,241
N (W)	479,707	166,252

Para la alternativa A, el agitador consume mayor potencia (tabla 3.8), esto se debe a las características de la cachaza, con un complejo de homogenización de la suspensión más complejo.

Turton *et al.* (2018) plantea que en cuanto a la corrosión el acero al carbono es aceptable para el NaOH a 27 °C y 1 atm, por lo tanto, el tanque de agitación se diseña con este material, además de ser muy común y de bajo costo.

3.4.3. Diseño del tanque de extracción ácida

El tanque de extracción ácida se diseña como un tanque de almacenamiento con un tiempo de cobertura para la alternativa A y para la B de 10 y 13 horas respectivamente, tiempo óptimo establecido para dicha etapa. La tabla 3.9 muestra las características de diseño del tanque de extracción ácida para cada alternativa.

Tabla 3.9. Especificaciones del tanque de extracción ácida para cada alternativa

Tanque	Alternativa A (Cachaza)			Alternativa B (Estiércol de ganado vacuno)		
	Volumen (m ³)	Diámetro (m)	Altura (m)	Volumen (m ³)	Diámetro (m)	Altura (m)
Extracción ácida	27,83	2,26	6,78	0,89	0,73	2,18

Para la alternativa A el tanque es de mayor capacidad, pues para esta alternativa se produce mayor cantidad de sustancias húmicas. El material de estos tanques es acero inoxidable 316, por la elevada acidez que presenta la solución.

Se emplea un tanque horizontal en soportes de concretos vertical para la alternativa A, mientras para la alternativa B, un tanque horizontal sobre patas, según la heurística 1 de Walas (2010).

3.4.4. Diseño de los equipos de separación y fraccionamiento de las sustancias húmicas

Como se define en la etapa experimental, para la alternativa A la combinación de operaciones es sedimentación – sedimentación y para la B, sedimentación – centrifugación. En los anexos 23 y 24 se detalla la metodología para el diseño de un sedimentador (Rosabal y Valle, 2006) y una centrífuga, respectivamente.

3.4.4.1. Diseño de los equipos de separación para la alternativa A

- Diseño del sedimentador para la separación de las sustancias húmicas

En los anexos 25 y 26 se muestran los resultados de la sedimentación en probeta para la separación de SH, para esta alternativa. La densidad de la partícula de la cachaza que se emplea en los cálculos es de $1\,795,86\text{ kg/m}^3$.

El menor valor de (QC'/A) es aproximadamente $25,30\text{ kg/h}\cdot\text{m}^2$ (figura 3.2). De acuerdo con Rosabal y Valle (2006), este valor tiene el significado físico del máximo gasto de sólidos por unidad de área que puede sedimentar en una capa de concentración C' y determina la capacidad del sedimentador en cuanto a clarificación.

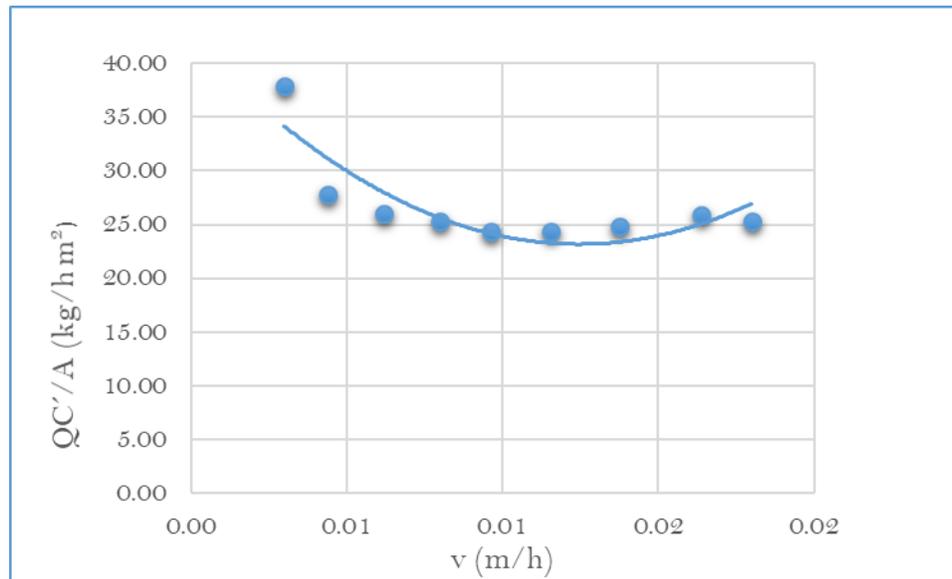


Figura 3.2. Determinación gráfica de $(QC'/A)_{\text{mín}}$ para el sedimentador de la etapa de separación de SH, en la alternativa A.

El flujo de sólidos (QC') que sedimenta corresponde solamente a la fracción que forma parte de la humina, pues el resto forma parte de las SH, los cuales contribuyen al contenido de MO de las mismas, esto se indica mediante la ecuación 3.8.

$$(QC')_{\text{Humina}} = \frac{W_H}{f_{chH}} \quad (\text{ec. 3.8})$$

Donde:

$(QC')_{\text{Humina}}$: flujo de sólidos que sedimenta de la humina, kg/h

W_H : flujo de humina producida, kg/h

f_{chH} : factor de corrección de humedad de la humina

Para una producción de $4082,83\text{ ton/año}$ de AH ($472,55\text{ kg/h}$), el flujo de humina es $1275,55\text{ kg/h}$. La humedad de la humina es de $92,09\%$, para un factor de corrección de

12,65. Sustituyendo en la ecuación 3.8, el flujo de sólidos que sedimenta es igual a 92,85 kg/h. Por tanto, el área mínima del sedimentador será 3,67 m².

La superficie real del sedimentador se determina por la ecuación 3.9 y debe ser mayor que el área calculada según los datos experimentales, para disminuir la influencia de la irregularidad de movimiento del líquido en la superficie sobre la velocidad de sedimentación. Kasatkin (1981) recomienda utilizar un factor de sobrediseño entre 1,3 y 1,35 mientras que otros autores (Perry y Green, 2008; Rosabal y Valle, 2006) consideran valores entre 1,2 y 1,3. Para un factor de sobrediseño igual a 1,3 el área real es igual a 4,77 m².

$$A_{real} = \text{factor de sobrediseño} \cdot A_{min} \quad (\text{ec. 3.9})$$

El diámetro se determina para un equipo de geometría circular y es igual a 2,47 m.

Las alturas correspondientes a la inmersión del tubo de alimentación, cono de fondo y altura de capacidad de almacenaje, se consideran un valor de 0,4 m cada una, para una altura total de 1,2 m.

- Diseño del sedimentador para el fraccionamiento de las sustancias húmicas

En los anexos 27 y 28 se muestran los resultados de la sedimentación en probeta para el fraccionamiento de SH, para la alternativa A. El menor valor de (QC'/A) es aproximadamente 4,0 kg/h·m² (figura 3.3). El flujo de sólidos (QC') que sedimenta corresponde solamente a la fracción de AH_{BS} (47,25 kg /h).

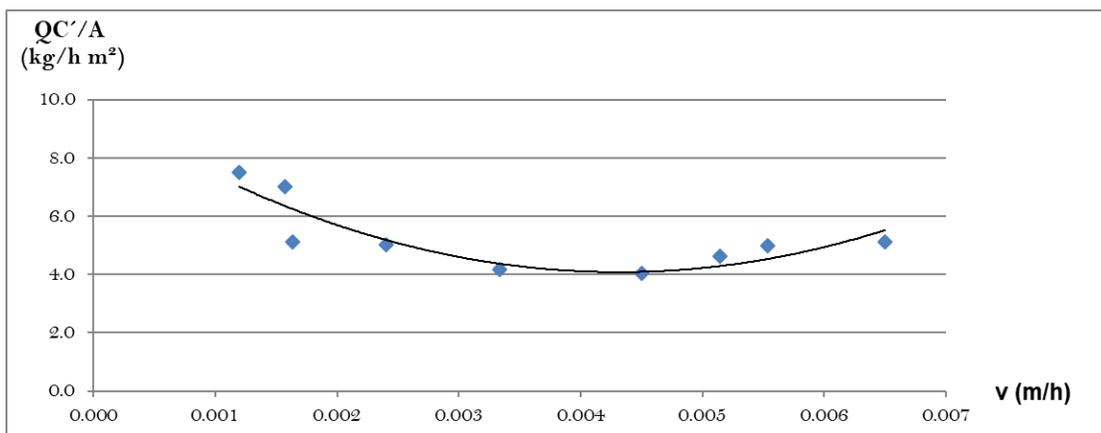


Figura 3.3. Determinación gráfica de $(QC'/A)_{mín}$ para el sedimentador de la etapa de fraccionamiento de SH, en la alternativa A.

El área mínima del sedimentador es de 11,81 m² y considerando un factor de sobrediseño de 1,3 el área real del equipo es igual a 15,35 m², con un diámetro de 4,42 m.

Las alturas correspondientes a la inmersión del tubo de alimentación, cono de fondo y altura de capacidad de almacenaje, se consideran un valor de 0,4 m cada una. Por tanto, la altura total del equipo es de 1,2 m.

Con respecto al tipo de material, según Perry y Green (2008), los más utilizados son el acero al carbono y el acero inoxidable. De acuerdo con TERSAINOX (2012) el acero inoxidable 316 es útil a temperatura ambiente en concentraciones de ácido por debajo del 20 % y aceptable para el hidróxido de sodio. Por las características de los materiales auxiliares a utilizar (concentraciones de ácido sulfúrico por debajo del 5 %) se selecciona el acero inoxidable 316, para los dos sedimentadores.

3.4.4.2. Diseño de los equipos de separación para la alternativa B

- Diseño del sedimentador para la separación de las sustancias húmicas

En los anexos 29 y 30 se muestran los resultados de la sedimentación en probeta para la separación de SH, para la alternativa B. La densidad de la partícula de estiércol de ganado vacuno es de 1 717,60 kg/m³. El menor valor de (QC'/A) es aproximadamente 12,54 kg/h·m² (figura 3.4). Al igual que para la cachaza, el flujo de sólidos (QC') que sedimenta corresponde solamente a los sólidos de la humina.

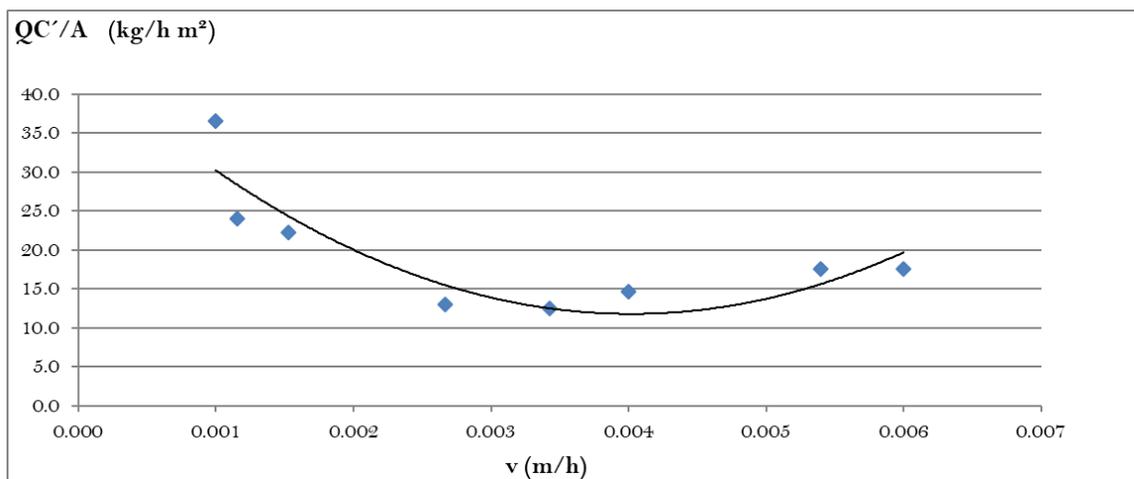


Figura 3.4. Determinación gráfica de $(QC'/A)_{\text{mín}}$ para el sedimentador de la etapa de separación de SH obtenidas a partir de estiércol de ganado vacuno.

Para una producción de 4082,83 ton/año de AH (472,55 kg/h), se produce 638,97 kg/h de humina. La humedad de la humina es de 93,24 % para un factor de corrección de humedad de 14,79. Por lo que el flujo de sólidos que sedimenta es igual a 40,28 kg/h. Por tanto, el área mínima del sedimentador será 3,21 m².

Para un factor de 1,3 se obtiene que el área real del sedimentador es de 4,17 m² y el diámetro para un equipo de geometría circular es de 2,30 m. Al igual que para la alternativa A, la altura total es de 1,2 m y el material es acero inoxidable 316.

- Diseño de la centrífuga para el fraccionamiento de las sustancias húmicas

El flujo de alimentación (Q_f) a la etapa de fraccionamiento de SH se determina por la ecuación 3.10 y es igual a 0,80 m³/h.

$$Q_f = Q_{SH} + Q_{H_2SO_4} \quad (\text{ec. 3.10})$$

Donde:

Q_{SH} : flujo de sustancias húmicas, m³/h

$Q_{H_2SO_4}$: flujo de ácido sulfúrico, m³/h

Se obtiene un flujo de ácido fúlvico de 0,12 m³/h (0,53 gal/min). De acuerdo con las especificaciones y características de centrífugas de sedimentación que se muestran el Anexo 31, se puede emplear centrífugas tubulares de 0,105 m (4 1/8 pulg) y 0,127 m (5 pulg), y de discos de 0,178 m (7 pulg), para una descarga de sólidos de forma intermitente.

La centrífuga de laboratorio que se escala presenta un volumen de 300 mL (0,0003 m³) y una velocidad angular de 3 000 rpm (314,16 rad/s). El radio de la superficie del líquido es despreciable en comparación con el radio final de la interfase entre el líquido y los sólidos sedimentados. Por tanto, el área equivalente de la centrífuga es 2,18 m².

Para escalar centrífugas de distintas clases se debe multiplicar Σ por un factor de eficiencia (ϵ), que es característico de cada centrífuga: 100 % para la centrífuga de botella, 80 % para las tubulares, y menos de 55 % para las de disco (Perry y Green, 2008)

En la tabla 3.10 se muestran los resultados de los parámetros necesarios para la selección de la centrífuga según las condiciones experimentales, donde la centrífuga que mejor se

ajusta a las especificaciones es la centrífuga tubular de 0,127 m (5 pulg) con las características que se indican en el anexo 32.

Se diseña de acero inoxidable 316 debido a que se trabaja con una disolución de H_2SO_4 y tanto Perry y Green (2008) como Turton *et al.* (2018) concuerdan que en cuanto a la corrosión el material es el apropiado.

Tabla 3.10. Resultados del escalado para las centrífugas propuestas para el fraccionamiento de SH.

Parámetros	Centrífugas			
	Botella	Tubular (4 1/8 pulg), (0,105 m)	Tubular (5 pulg), (0,127 m)	Discos (7 pulg) (0,178 m)
Q_0 (m ³ /h)	0,0003	0,80	0,80	0,80
ϵ	1,00	0,80	0,8	0,55
Σ (m ²)	2.18	7266,67	7266,67	10650,70
Σ (m ²) (Anexo 32)	-	2 508,32	3 901,93	19 974,15
Error (%)		65,47	46,30	46,68

Para la selección del equipo determinante en cada caso base, se aplica la técnica de cuello de botella (*debottlenecking*). En el anexo 33 se muestran los resultados de capacidad de cada equipo al aumentar en un 10 % el volumen de producción. Para ambas alternativas (caso A y caso B), el equipo determinante es el sedimentador para la separación de las sustancias húmicas en la extracción básica, con 17 % y 21 % de incremento en el área respectivamente Turton *et al.* (2018).

3.5. Macrolocalización de las plantas de producción de ácido húmico

Para lograr una correcta macrolocalización de la planta, para ambas alternativas, se tienen en cuenta varios factores: mano de obra, fuentes de materia prima, disponibilidad de agua y de electricidad, medios de transporte y comunicación y eliminación de efluentes.

Para la alternativa A se propone ubicar la planta en áreas cercanas a los centrales azucareros. En estas industrias hay personal calificado que puede trabajar en esta planta, la materia prima principal es la cachaza, un residuo del proceso de producción de azúcar

crudo, se ahorrarían costos de transporte y este proceso no tiene residuo, pues los subproductos ácido fúlvico y humina pueden utilizarse, como fertilizante y alimento animal (Tadini *et al.*, 2015; Zavarzina *et al.*, 2002; Zhang *et al.*, 2018), respectivamente.

Para la alternativa B se propone ubicar la planta en las mediaciones de las vaquerías pertenecientes a la U.E.B número 4, situadas en la zona de Triunvirato. La Empresa Pecuaria Genética de Matanzas cuenta con personal calificado para trabajar en la planta y con los medios de transporte y comunicación necesarios para el movimiento de la materia prima hacia la zona de procesamiento. Además, existe una elevada disponibilidad de esta materia prima. Al igual que para la alternativa A, no se necesita sistema de tratamiento de residuales, pues los subproductos (H y AF) pueden reutilizarse (Tadini *et al.*, 2015; Zavarzina *et al.*, 2002; Zhang *et al.*, 2018).

Los Lineamientos de la Política Económica y Social del Partido y la Revolución incentiva a través de los lineamientos 158, 159, 160, 161 y 168 del capítulo VII, la política agroindustrial:

- 158. Diseñar y aplicar servicios de asistencia técnica, capacitación y extensión agraria, para asimilar eficientemente las nuevas tecnologías que contribuyan a una mejor organización de la fuerza laboral, aseguren el aumento de la productividad y tengan en cuenta las transformaciones ocurridas y proyectadas en el sector.
- 159. Desarrollar una agricultura sostenible, empleando una gestión integrada de ciencia, tecnología y medio ambiente, aprovechando y fortaleciendo las capacidades disponibles en el país, además que reconozca las diversas escalas productivas.
- 160. Priorizar la conservación, protección y mejoramiento de los recursos naturales, entre ellos, el suelo, el agua y los recursos zoo y fitogenéticos. Recuperar la producción de semillas de calidad, la genética animal y vegetal; así como el empleo de productos biológicos nacionales.
- 161. Sostener y desarrollar investigaciones integrales para proteger, conservar y rehabilitar el medio ambiente, evaluar impactos económicos y sociales de eventos extremos, y adecuar la política ambiental a las proyecciones del entorno económico y social. Ejecutar programas para la conservación, rehabilitación y uso racional de

recursos naturales. Fomentar los procesos de educación ambiental, considerando todos los actores de la sociedad.

- 168. Incrementar la producción de viandas y hortalizas con una adecuada estructura de cultivos, sobre la base de aumentar los rendimientos y lograr una mejor utilización del balance de áreas de cultivos varios.

3.6. Valoración económica de las alternativas de los casos base A y B

Se realiza una valoración económica de las dos alternativas caso base propuestas para la obtención de ácido húmico:

Alternativa A: Obtención de AH a partir de la cachaza, una planta que recopile la cachaza de los tres centrales, con una demanda de 3400,00 ton/año de AH, con las operaciones de separación, sedimentación - sedimentación.

Alternativa B: Obtención de AH a partir del estiércol de ganado vacuno, una planta que recopile el estiércol de ganado vacuno de las UEB, con una demanda de 2000,00 ton/año de AH, con las operaciones de separación sedimentación – centrifugación.

Para la valoración económica de las alternativas se aplica la metodología propuesta por Turton *et al.* (2018), mostrada en el anexo 34.

El anexo 35 muestra los costos de adquisición de equipos para cada alternativa. A pesar de la alternativa B constar de una etapa de separación de centrifugación (más costosa que la de sedimentación), el costo total de adquisición de los equipos es menor, se debe a que la planta requiere menos volúmenes de agua y extractantes, por lo que los equipos son de menor capacidad.

A partir del costo de adquisición de los equipos, se estima el capital total de inversión, y con este se determina el costo de operación de cada alternativa. En la tabla 3.11 se muestran el costo de adquisición de los equipos (C_{ADQ}), el costo total del módulo (CTM), el costo que incluye el desmonte y construcción (CGR), el capital de trabajo o circulante (WC) y el capital fijo invertido (FCI), actualizados para cada variante de proceso (tabla 3.11).

Tabla 3.11. Costos (CUP) para cada alternativa

Costos	Alternativa A	Alternativa B
Adquisición de los equipos (C_{ADQ})	49 662 127,00	23 125 783,00
Total del módulo (C_{TM})	58 601 309,86	27 288 423,94
Desmote y construcción (C_{GR})	75 983 054,31	35 382 447,99
Capital de trabajo o circulante (WC)	11 397 458,15	5 307 367,20
Capital fijo invertido (FCI)	87 380 512,46	40 689 815,19

El costo de inversión de la alternativa A es superior en un 53 % al costo de la alternativa B, a pesar de tener una centrífuga para la etapa de fraccionamiento de las sustancias húmicas (extracción ácida), más costosa que un sedimentador. Este incremento se debe principalmente a que se tratan mayores volúmenes de materia prima, extractantes y agua.

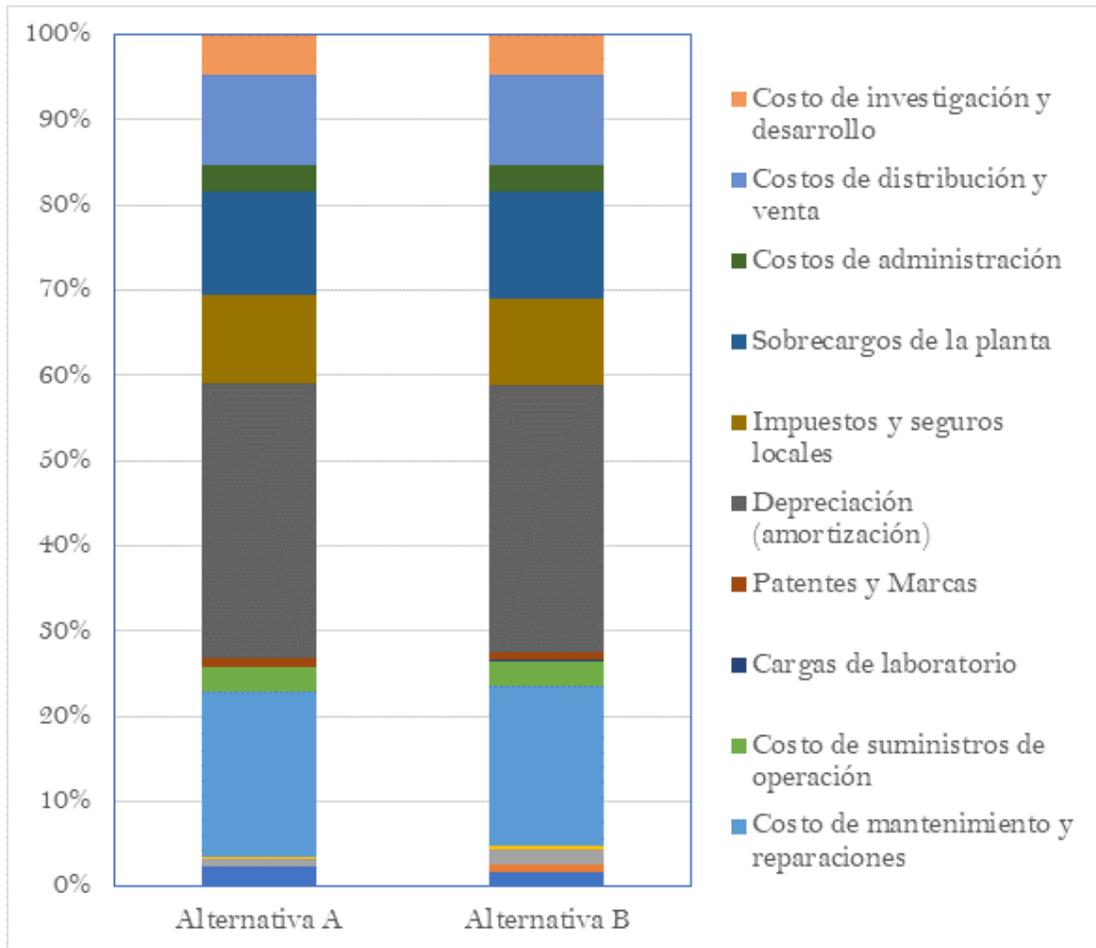


Figura 3.5. Estructura de costos para las dos alternativas, expresados como porcentaje del costo de operación

En el anexo 36 muestra el criterio de selección del número de operarios, según el equipo.

Como se puede apreciar en la figura 3.5, los costos de amortización, de mantenimiento y reparaciones, de impuestos y seguros locales y de sobrecargos de la planta, representan los principales elementos de costo para todas las dos alternativas.

Ambas alternativas arrojan valores de costo por peso inferior a la unidad, lo que justifica la inversión. La alternativa B presenta indicadores de producción más eficientes que la alternativa A, menor costo por producción (tabla 3.12). Esto se debe a que los costos de producción de la alternativa B disminuyen en un 44 % con respecto a la alternativa B.

Tabla 3.12. Indicadores económicos de producción para las dos alternativas

Indicadores de producción	Alternativa A	Alternativa B
Ganancia (\$/a)	14 044390,81	10 440004,65
Valor de la producción	39 270000,00	23 100000,00
Costo de producción (\$/a)	25 225609,19	12 659995,35
Costo por peso	0,65	0,55
Rentabilidad	55,68	82,46

Se determinan los indicadores económicos de factibilidad, el % Retorno de la inversión, el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa de Interna de Retorno (TIR) y el Plazo de Recuperación de la Inversión (PRI). Para el cálculo de estos indicadores se fijó un interés de 10 %, según lo recomendado por Turton *et al.* (2018) para plantas químicas. Los resultados se muestran en la tabla 3.13 y el flujo de caja para estas alternativas se muestra en el anexo 37.

Las dos alternativas son rentables, el valor neto del dinero (VAN) es positivo (tabla 3.13), por lo que se puede aceptar el proyecto de inversión para ambas variantes. Se debe destacar que al igual que en los indicadores económicos de producción, en estos de eficiencia de la inversión se observa mayores beneficios para la alternativa B, en apenas 1,17 año se recupera la inversión, con un 85,28 % de retorno.

Se debe destacar que estos resultados son considerando solo la venta de ácido húmico, pero puede ser vendido también el ácido fúlvico, que se aplicar de forma foliar, por lo que aumentará la factibilidad económica de las plantas.

Se realiza un análisis de sensibilidad, con respecto a los precios de los extractantes para ambas alternativas, se aumenta el 50 % de los precios del hidróxido de sodio y del ácido sulfúrico. En la tabla 3.14 se muestra un resumen de los indicadores económicos obtenidos.

Tabla 3.13. Indicadores económicos de factibilidad de las dos alternativas.

Indicadores económicos	Alternativa A	Alternativa B
% Retorno (%)	26,70	25,66
PRI (año)	3,74	3,89
VAN (CUP)	52 607731,56	37 763451,26
TIR (%)	12,00	29,00

Al incrementar en un 50 % los precios de los extractantes hidróxido de sodio y ácido sulfúrico los indicadores económicos de los casos base A y B no reflejan cambios significativos, lo que demuestra que el gasto de materiales de utilidades no es de influencia en los costos de producción.

Tabla 3.14. Resultados de los indicadores económicos, con aumento de los precios de los extractantes básico y ácido.

Indicadores de producción	Alternativa A		Alternativa B	
	Con precios actuales de los extractantes	Aumento en un 50 % de los precios de los extractantes	Con precios actuales de los extractantes	Aumento en un 50 % de los precios de los extractantes
Costo de producción (\$/a)	25 225609,19	25 332336,22	12 659995,35	13 090544,46
Costo por peso	0,65	0,65	0,55	0,57
% Retorno (%)	26,74	26,18	25,66	25,00
PRI (año)	3,74	3,82	3,89	4,00
VAN (CUP)	52607731,56	51951940,18	37763451,26	35435377,93
TIR (%)	12,00	11,00	29,00	28,00

3.7. Valoración económica de variantes de las alternativas caso base

A continuación, se valoran varias variantes de las alternativas caso base A y B, teniendo en cuenta las operaciones de separación en las etapas de extracción básica y ácida, y la macrolocalización de las plantas, en cada central o unidad productora pecuaria (con producciones menores de ácido húmico). En la tabla 3.4 se describen estas variantes.

Alternativa A1: Producción anual de ácido húmico de 1000 toneladas, a partir de la cachaza, en cada central, manteniendo las operaciones de la variante A.

Alternativa A2: Producción de ácido húmico, a partir de la cachaza, recopilada de los tres centrales, con una producción anual de 2000 toneladas, pero modificando las operaciones de separación en las etapas de extracción básica y ácida, usar sedimentación y centrifugación, respectivamente.

Alternativa A3: Producción de ácido húmico, a partir de la cachaza, recopilada de los tres centrales, con una producción anual de 2000 toneladas, pero modificando las operaciones de separación en las etapas de extracción básica y ácida, usar centrifugación y centrifugación, respectivamente.

Alternativa B1: Producción de ácido húmico, a partir estiércol de ganado vacuno, en cada unidad productora pecuaria, con una producción anual de 1000 toneladas de ácido húmico, manteniendo las operaciones de la variante B.

Alternativa B2: Producción de ácido húmico, a partir de estiércol de ganado vacuno, recopilada de las cinco unidades productoras pecuarias, con una producción anual de 700 toneladas, pero modificando las operaciones de separación en las etapas de extracción básica y ácida, usar centrifugación y centrifugación, respectivamente.

3.7.1. Valoración económica de las alternativas A1, A2 y A3

En el anexo 38 se muestran los parámetros de diseño de los diferentes equipos de las variantes de la alternativa A. La tabla 3.15 muestra los costos de inversión de cada alternativa. El costo de inversión de la Alternativa es aproximadamente 78,4 % inferior al costo de la inversión de la Alternativa base A, esto se debe a que disminuyen considerablemente los costos de adquisición de los equipos, al trabajar con menores

capacidades. Las alternativas A2 y A3 arrojan costos similares, pero inferiores también a la alternativa caso base A.

Tabla 3.15. Costos (CUP) de inversión para cada alternativa del caso base A

Costo	Alternativa A	Alternativa A1	Alternativa A2	Alternativa A3
C_{ADQ}	49 662 127,00	10 514 500,00	22 952 500,00	23 990 000,00
C_{TM}	58 601 309,86	12 407 110,00	27 083 950,00	28 308 200,00
C_{GR}	75 983 054,31	16 087 185,00	35 117 325,00	36 704 700,00
WC	11 397 458,15	2 413 077,75	5 267 598,75	5 505 705,00
FCI	87 380 512,46	18 500 262,8	40 384 923,75	42 210 405,00

En la figura 3.6 se muestra la estructura de costo de la alternativa caso base A, y de sus variantes. Existe similitud en los elementos de los costos en todas las alternativas, coincide que los costos de amortización, de mantenimiento y reparaciones, de impuestos y seguros locales y de sobrecargos de la planta, representan los principales elementos de costo.

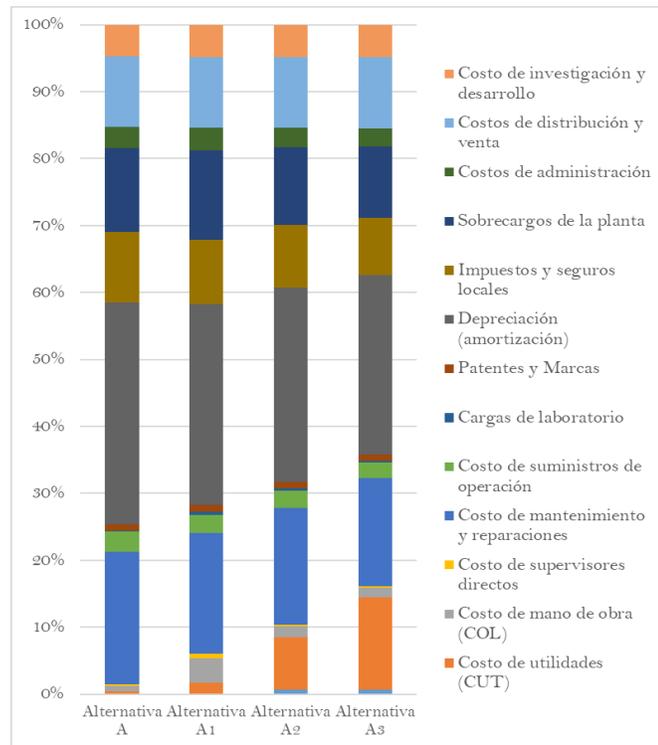


Figura 3.6. Estructura de costos para las alternativas del caso base A, expresados como porcentaje del costo de operación

Los indicadores económicos de producción (tabla 3.16), arrojan que todas las variantes de la alternativa A son factibles. La alternativa A1 da los mejores resultados, lo cual se debe a que disminuyen los costos de transportación, pues las plantas estarán ubicadas en los propios centrales.

Tabla 3.16. Indicadores económicos de producción para las alternativas del caso base A

Indicadores económicos de producción	Alternativa			
	A	A1	A2	A3
Volumen de producción (t/a)	3400,00	1000,00	2000,00	2000,00
Ganancia (\$/a)	14 044390,81	5 625481,87	9 731565,61	7 859283,55
Valor de la producción	39 270000,00	11 550000,00	23 100000,00	23 100000,00
Costo de producción (\$/a)	25 225609,19	5 924518,132	13 368434,39	15 240716,45
Costo por peso	0,65	0,51	0,58	0,66
Rentabilidad (%)	55,68	94,95	72,80	51,58

Al comparar los indicadores económicos de factibilidad, se obtiene al igual que las variantes de la alternativa A, son más factibles que el caso base y coincide que la alternativa A1 es la más factible económicamente, al igual que técnicamente. En el anexo 39 se muestran los flujos de cajas para las alternativas del caso base A

Tabla 3.17. Indicadores económicos de factibilidad de las alternativas del caso base A

Indicadores económicos	Alternativa A	Alternativa A1	Alternativa A2	Alternativa A3
% Retorno (%)	26,74	37,74	46,51	29,67
PRI (año)	3,74	2,65	2,17	3,37
VAN (CUP)	52 607731,56	27 433498,68	43 974501,55	32 017956,81
TIR (%)	23,00	39,00	32,00	26,00

Todas las alternativas de producción de ácido húmico a partir de la cachaza como materia prima pueden ser aplicadas, pues arrojan resultados económicamente factibles, pero la alternativa de la producción anual de ácido húmico de 1000 toneladas, a partir de la cachaza, en cada central, con las operaciones de operación sedimentación – sedimentación (A1), es la más factible desde el punto de vista técnico y económico.

3.7.2. Valoración económica de las alternativas B1 y B2

En el anexo 40 se muestran los parámetros de diseño de los diferentes equipos de las variantes de la alternativa B. Las alternativas son:

Alternativa B1: Producción de ácido húmico, a partir estiércol de ganado vacuno, en cada unidad productora pecuaria, con una producción anual de 1000 toneladas de ácido húmico, manteniendo las operaciones de la variante B.

Alternativa B2: Producción de ácido húmico, a partir de estiércol de ganado vacuno, recopilada de las cinco unidades productoras pecuarias, con una producción anual de 700 toneladas, pero modificando las operaciones de separación en las etapas de extracción básica y ácida, usar centrifugación y centrifugación, respectivamente.

Al analizar los costos de inversión en las alternativas del caso base B (tabla 3.18), se observa que ambas variantes, B1 y B2, arrojan menor costo que el caso base, donde disminuye en un 50 % y un 28,2 % respectivamente.

Tabla 3.18. Costos (CUP) de inversión para cada alternativa del caso base B

Costo	Alternativa B	Alternativa B1	Alternativa B2
C _{ADQ}	23 125783,00	10 514500,00	25 968000,00
C _{TM}	27 288423,94	12 407110,00	3 0642240,00
C _{GR}	35 382447,99	16 087185,00	39 731040,00
WC	5 307367,20	2 413077,75	5 959656,00
FCI	40 689815,19	18 500262,8	11 919312,00

En la figura 3.7 se observa que los costos con mayor representación son los costos de mantenimiento y reparaciones, de impuestos y seguros locales y los costos de distribución de venta. En el caso de las alternativas B y B2, los costos de amortización también son elevados, al igual que los de consumo de materia prima para la alternativa B2.

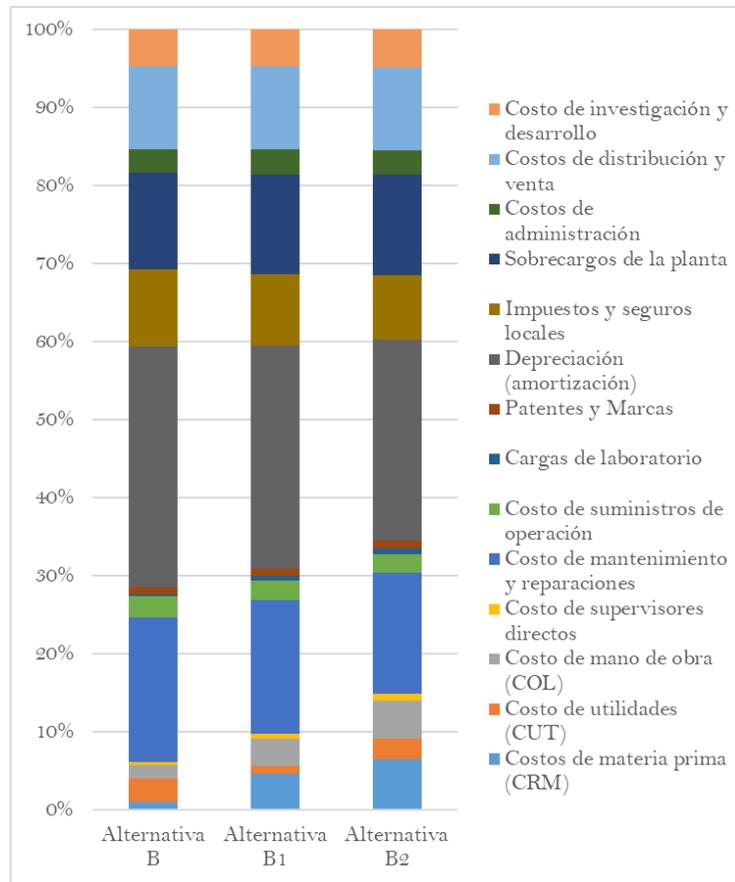


Figura 3.7. Estructura de costos para las alternativas del caso base B, expresados como porcentaje del costo de operación

En la tabla 3.19 se muestran los indicadores económicos de producción de las alternativas B, B1 y B2. En las alternativas B1 y B2 el costo por peso es inferior al de la alternativa B, pues los consumos de extractantes son menores.

Tabla 3.19. Indicadores económicos de producción para las alternativas del caso base B

Indicadores económicos de producción	Alternativa		
	B	B1	B2
Volumen de producción (t/a)	2000,00	1000,00	700,00
Ganancia (\$/a)	34 701255,67	5313694,00	3615410,72
Valor de la producción	47 156709,60	11 550000,00	8 085000,00
Costo de producción (\$/a)	12 455453,93	6 236305,66	4 469589,28
Rentabilidad (%)	84,46	85,21	80,89
Costo por peso	0,26	0,54	0,55

La tabla 3.20 muestra los indicadores económicos de factibilidad. Las tres alternativas pueden aceptarse, pues presentan un VAN positivo (anexo 41). El plazo de recuperación de la inversión es menor en las alternativas B1 y B2. Estos resultados coinciden con los indicadores de inversión y de producción.

Tabla 3.20. Indicadores económicos de factibilidad de las alternativas del caso base B

Indicadores económicos	Alternativa B	Alternativa B1	Alternativa B2
% Retorno	25,66	37,60	30,33
PRI (año)	3,89	2,65	2,30
VAN (CUP)	37763451,26	25517699,00	17619723,03
TIR (%)	29,00	32,00	39,00

Las tres alternativas de obtención de ácido húmico, a partir del estiércol de ganado vacuno pueden ser aceptadas, pues arrojan indicadores económicos confiables. La alternativa más factible es la producción de ácido húmico, a partir de estiércol de ganado vacuno, recopilada de las cinco unidades productoras pecuarias, con una producción anual de 700 toneladas, con las operaciones de separación centrifugación – centrifugación (B2).

3.8. Conclusiones del capítulo

1. La demanda de fertilizante orgánico está sujeta a los altos precios de las materias primas en el mercado internacional; una variante de solución es la producción de ácido húmico a partir de la cachaza y el estiércol de ganado vacuno, residuos de la industria agropecuaria nacional, con la consiguiente sustitución de importaciones.
2. La base de datos preliminar con información relativa a los casos de estudio A y B, evidenció una demanda de 4 082 832 kg/a de ácido húmico y una disponibilidad diaria de 605 641,6 kg de cachaza y 150421,95 kg de estiércol de ganado vacuno.
3. El proceso de obtención de ácido húmico a partir de cachaza y de estiércol de ganado vacuno arrojó valores de beneficio bruto de 11,19 y 11,37 \$/kg AH respectivamente y se ejecutaron las operaciones unitarias: lixiviación, separaciones

de compuestos químicos, mezclado o división de corrientes y separación de fases para ambas alternativas.

4. Se determinaron los parámetros de diseño de los equipos involucrados en el proceso de obtención de ácido húmico en ambas alternativas del caso base, tanques de almacenamiento de los extractantes, del agua, del ácido húmico y de los subproductos, tanque de mezclado para la extracción básica, sedimentador y/o centrífuga y tanque para la extracción ácida.
5. Se determina que en ambas alternativas caso base el equipo determinante es el sedimentador diseñado para la etapa de separación de las sustancias húmicas en la extracción básica.
6. Se definió la macrolocalización de la planta en función de los factores establecidos, para la alternativa A se propone la ubicación en áreas cercanas a los centrales azucareros, y para la alternativa B en las mediaciones de las vaquerías pertenecientes a la U.E.B número 4, situadas en la zona de Triunvirato.
7. La valoración económica demostró la factibilidad de las alternativas del caso base, a partir del análisis de los indicadores de producción y de inversión, con resultados de costo por peso inferior a la unidad y de Plazo de Recuperación de la Inversión de 3,74 y 3,89 para las alternativas A y B respectivamente.
8. Se demostró que la variante A1 de la alternativa A: producción de ácido húmico, a partir de la cachaza, en cada central, con una producción anual de 1000 toneladas de ácido húmico, manteniendo las operaciones de la variante A, es la más factible, con un costo por peso de 0,51, un Plazo de Recuperación de la Inversión de 2,65 y una Tasa de Recuperación de la Inversión de 39 %.
9. Se demostró que la variante B2 de la alternativa B: producción de 700 t/a de ácido húmico a partir de estiércol de ganado vacuno con las operaciones de separación, centrifugación - centrifugación, es la más factible, con un costo por peso de 0,55, un Plazo de Recuperación de la Inversión de 2,50 y una Tasa de Recuperación de la Inversión de 39 %.

CONCLUSIONES

Como resultado final del trabajo desarrollado, se ha podido arribar a las siguientes conclusiones:

1. Se propusieron siete variantes de secuencias de operaciones tecnológicas factibles para la obtención de ácido húmico, a partir de la cachaza y el estiércol de ganado vacuno, residuos de la industria agropecuaria nacional.
2. La metodología de extracción de sustancias húmicas que mejor se ajusta a la disponibilidad de materias primas cubanas, es la combinación de extractantes básico y ácido, hidróxido de sodio - ácido sulfúrico, con 34,07 % de rendimiento y un beneficio bruto de 19,46 \$/kgAH.
3. Las materias primas adecuadas para la obtención de ácido húmico son la cachaza y el estiércol de ganado vacuno, con rendimientos de extracción de 37,93 % y 40,75 % y una disponibilidad diaria de 605 641,6 kg y 150 421,95 kg, respectivamente.
4. Las condiciones óptimas de extracción de ácido húmico a partir de la cachaza son: 0,12 g/ml de relación sólido - líquido y un tiempo de extracción de cada etapa de 10 horas, para un rendimiento de 15,72 %, bajo condiciones de almacenamiento en un área techada como mínimo tres semanas y con un pretratamiento de trituración.
5. Las condiciones óptimas de extracción de ácido húmico, a partir del estiércol de ganado vacuno son: 0,10 g/ml de relación sólido - líquido y un tiempo de extracción de cada etapa de 10 y 13 horas respectivamente, para un rendimiento de 27,19%, almacenada como mínimo seis semanas, a la intemperie y sin pretratamiento.
6. El ácido húmico obtenido a partir de la cachaza y el estiércol de ganado vacuno presenta contenidos de materia orgánica de 60,30 % y 60,71 % respectivamente; con presencia en su estructura de grupos carbonilos, hidroxilos y carboxilos, lo que corrobora la acidez de este producto.

7. Las alternativas de producción de ácido húmico con los resultados más factibles son las variantes: producir 1000 toneladas anuales a partir de cachaza con sedimentación – sedimentación (A1) y producir 700 toneladas a partir de estiércol de ganado vacuno con centrifugación – centrifugación (B2), con un costo por peso de 0,51 y 0,55, un Plazo de Recuperación de la Inversión de 2,65 y 2,50 y una Tasa de Recuperación de la Inversión de 39 %, respectivamente.

RECOMENDACIONES

Basadas en las conclusiones obtenidas y para la extensión futura de la presente investigación, se realizan las siguientes recomendaciones:

1. Realizar los estudios de producción de ácido húmico a escalas superiores, para su implementación industrial.
2. Realizar estudios de aplicación del producto en cultivos de corto plazo, en organopónicos.
3. Valorar la posibilidad de obtener ácido húmico a partir de las materias primas estudiadas, para uso no agrícola.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmad, I., Saquib, R. U., Qasim, M., Saleem, M., Khan, A. S., y Yaseen, M. (2013). Humic acid and cultivar effects on growth, yield, vase life, and corm characteristics of gladiolus. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 73(4), 339-344.
- Amir, S., Hadi, M., Merlina, G., Hamdi, H., y Revel, J.-C. (2004). Elemental analysis, FTIR and ¹³C-NMR of humic acids from sewage sludge composting. *Agronomie*, 24, 13-18.
- Antilén, M., Silva, K., Acevedo, S., Amiama, F., Faúndez, M., Knicker, H., y Pizarro, C. (2014). Characterization of humic acids extracted from biosolid amended soils. *Journal of soil science and plant nutrition*, 14(4), 1005-1020.
- Asing, J., Wong, N., y Lau, S. (2009). Optimization of extraction method and characterization of humic acid derived from coals and composts. *J. Trop. Agric. and Fd. Sc*, 37(2), 211-223.
- Baca, E. E. (2015). *Influencia de los ácidos húmicos y fúlvicos en el crecimiento y desarrollo en betarraga (Beta vulgaris L) en condiciones de invernadero* Universidad Privada Antenor Orrego]. Trujillo, Perú.
- Baghdadi, A., Halim, R. A., Ghasemzadeh, A., Ramlan, M. F., y Sakimin, S. Z. (2018). Impact of organic and inorganic fertilizers on the yield and quality of silage corn intercropped with soybean. *Peer Journal*, 26.
- Baglieri, A., Ioppolo, A., Negre, M., y Gennari, M. (2007). A method for isolating soil organic matter after the extraction of humic and fulvic acids. *Organic geochemistry*, 38(1), 140-150.
- Benites, V. M., Madari, B., y Machado, P. L. O. d. A. (2003). *Extração e Fracionamento Quantitativo de Substâncias Húmicas do Solo: um Procedimento Simplificado de Baixo Custo* (1517-5685).
- Calderín, A., Pimentel, J. J., Martínez, D., Huelva, R., y Guridi, F. (2016). Efeitos no cultivo do milho de um extrato líquido humificado residual, obtido a partir de vermicomposto. *AGRICULTURA CONSERVACIONISTA*, 25(1), 38-43.
- Calvo, P., Nelson, L., y Kloepper, J. W. (2014). Agricultural uses of plant biostimulants. *Plant Soil*, 383, 3-41.
- Chandan, K. J., Nilanjana, D., y Gunindra, N. C. (2016). Improved extraction of humic acids from vermicomposted organic waste by a column-based continuous elution method. *Separation Science and Technology*, 51(17), 2780-2789.

- Chianese, S., Fenti, A., Iovino, P., Musmarra, D., y Salvestrini, S. (2020). Sorption of Organic Pollutants by Humic Acids: A Review. *Molecules*, 25(918), 1-17.
- Constantino, I. C., Viana, J. G., Teixeira, P. A., Moreira, A. B., Gama, G. P., Paschoal, F. M., y Bisinoti, M. C. (2021). Interaction of Pb, Ni and Cd with Aquatic Humic Substances of Amazonian Blackwater Rivers. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 32, 260-268. <https://doi.org/10.21577/0103-5053.20200176>
- Cornelissen, E. R., Moreau, N., Siegers, W. G., Abrahamse, A. J., Rietveld, L. C., Grefte, A., Dignum, M., Amy, G., y Wessels, L. P. (2008). Selection of anionic exchange resins for removal of natural organic matter (NOM) fractions. *Water Research*, 42, 413-423.
- De Oliveira, L. K., De Almeida, C., Fernandes, L., Friese, K., y Rosa, A. H. (2016). Interaction of arsenic species with tropical river aquatic humic substances enriched with aluminum and iron. *Environ Sci Pollut Res*, 23, 6205-6216.
- De Souza, F., y Roca, S. (2018). Extraction and characterization of humic acid from coal for the application as dispersant of ceramic powders. *Journal of Materials Research and Technology*, 7(3), 254-260.
- Douglas, J. M. (1998). *Conceptual Design of Chemical*.
- Fong, S. S., Seng, L., Majri, N. B., y Mat, H. B. (2007). A comparative evaluation on the oxidative approaches for extraction of humic acids from low rank coal of Mukah, Sarawak. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 18(1), 34-40.
- Forero, F. E., Torres, J., y Balaguera-López, H. E. (2008). Efecto de la aplicación de la cachaza fresca y de dos sistemas de producción de maíz y de maíz con asocio frijol sobre ñlas propiedades físicas de un Inceptisol. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 2(2), 205-216.
- Fuentes, M., Baigorri, R., González-Gaitano, G., García-Mina, J. M. J. J. o. s., y sediments. (2018). New methodology to assess the quantity and quality of humic substances in organic materials and commercial products for agriculture. *18(4)*, 1389-1399.
- Funes, F., y Vázquez, L. L. (2016). *Avances de la agroecología en Cuba* (1ra ed.).
- Galba, J., Basílio, D., Barros, L., Rocha, A., y Pasqualoto, L. (2010). Humic substances isolated from residues of sugar cane industry as root growth promoter. *Science Agriculture*, 67(2), 206-2012.
- García, P. (2021). *Empleo de sustancias tipo húmicas obtenidas a partir de diferentes residuos orgánicos en la eliminación de contaminantes emergentes* [Universidad de Valencia].

- Gerke, J. (2021). The effect of humic substances on phosphate and iron acquisition by higher plants: Qualitative and quantitative aspects. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*.
- Ghouas, H., Haddou, B., Kameche, M., Derriche, Z., y Gourdon, C. (2012). Extraction of humic acid by coacervate: Investigation of direct and back processes. *Journal of hazardous materials*, 205, 171-178.
- Gomes de Melo, B. A., Lopes Motta, F., y Andrade Santana, M. H. (2016). Humic acids: Structural properties and multiple functionalities for novel technological developments. *Materials Science and Engineering C*, 62, 967-974.
- Gómez, M. D. (2019). *Aplicación de diferentes dosis de ácidos húmicos, fúlvicos en tres híbridos de maíz (Zea mays L.), en la zona de Pueblo Viejo* UNIVERSIDAD TÉCNICA DE BABAHOYO]. Los Ríos, Ecuador.
- Gong, M., Nanda, S., Romero, M. J., Zhu, W., y Kozinski, J. A. (2017). Subcritical and supercritical water gasification of humic acid as a model compound of humic substances in sewage sludge. *The Journal of Supercritical Fluids*, 119, 130-138.
- Hayes, M. H., y Swift, R. S. (2020). Vindication of humic substances as a key component of organic matter in soil and water. *Advances in Agronomy*, 163, 1-37. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2020.05.001>
- Helal, A. A., Murad, G. A., y Helal, A. A. (2011). Characterization of different humic materials by various analytical techniques. *Arabian Journal of Chemistry*, 4, 41-54.
- Hernández, R., García, A., Portuondo, L., Muñiz, S., Berbara, R., y Izquierdo, F. (2012). Protección antioxidativa de los ácidos húmicos extraídos de vermicompost en arroz (*Oryza sativa L.*) var. IACuba30. *Revista Protección Vegetal*, 27(2), 102-110.
- Hu, Z.-T., Huo, W., Chen, Y., Zhang, Q., Hu, M., Zheng, W., Shao, Y., Pan, Z., Li, X., y Zhao, J. (2022). Humic Substances Derived From Biomass Waste During Aerobic Composting and Hydrothermal Treatment: A Review. *Frontiers Bioengineering and Biotechnology*, 10.
- Huculak-Maczka, M. (2020). Evaluation of the removal potential of fulvic acids after ultrasound assisted extraction of humic substances from peat. *DESALINATION AND WATER TREATMENT*, 199, 84-98. <https://doi.org/10.5004/dwt.2020.26313>
- Huelva, R., Martínez, D., Calderín, A., Hernández, O. L., y Guridi, F. (2013). Propiedades químicas y química-físicas de derivados estructurales de ácidos húmicos obtenidos de vermicompost. Actividad biológica. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 22(2), 56-60.
- Hutta, M., Góra, R., Halko, R., y Chalányová, M. (2011). Some theoretical and practical aspects in the separation of humic substances by combined liquid chromatography methods. *Journal of Chromatography A*, 1218, 8946-8957.

- Jana, C. K., Das, N., y Chattopadhyay, G. N. (2016). Improved extraction of humic acids from vermicomposted organic waste by a column-based continuous elution method. *Separation Science and Technology*, 51(17), 2780-2789.
- Jindo, K., Olivares, F. L., Malcher, D. J. D. P., Sánchez-Monedero, M. A., Kempenaar, C., y Canellas, L. P. (2020). From lab to field: role of humic substances under open-field and greenhouse conditions as biostimulant and biocontrol agent. *Frontiers in plant science*, 11, 426. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00426>
- Kasatkin, A. G. (1981). *Operaciones básicas y aparatos en la tecnología química. Tomo I.* (E. P. y Educación, Ed.).
- Kulikowska, D., Mariusz, G. Z., Bułkowska, K., y Kierklo, K. (2015). Humic substances from sewage sludge compost as washing agent effectively remove Cu and Cd from soil. *Chemosphere*, 136, 42-49.
- Lukyanov, N. V., Syroezhko, A. M., Slavoshevskaya, N. V., Strakhov, V. M., Potekhin, V. M., y Itskovich, V. A. (2016). Extraction of Humic Acids from Kansk-Achinsk Lignite. *Coke and Chemistry*, 59(2), 48-53.
- Márquez, F. (2003). Síntesis de procesos Químicos. *Departamento de Ingeniería Química. Universidad de Concepción. Concepción, República de Chile.*
- Martín, I., Salcedo, R., y Font, R. (2011). MECÁNICA DE FLUIDOS Tema5. Operaciones separación sólido-fluido. *Universidad de Alicante*, 15-27.
- Martínez, J., Berbel, J., y Ordóñez, R. (2021). Nitrogen Fertilization. A Review of the Risks Associated with the Inefficiency of Its Use and Policy Responses. *Sustainability*, 13(5625).
- McCabe, W. L., J.C., S., y Harriott, P. (1991). *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química* (McGraw-Hill, Ed. Cuarta edición ed.).
- Mema, V. (2006). *Identification of extraction methods for the production of humic acids from black liquor* [University of Stellenbosch].
- Michalska, J., Turek-Szytów, J., Dud, A., y Surmacz-Górska, J. (2022). Characterization of humic substances recovered from the sewage sludge and validity of their removal from this waste. *EFB Bioeconomy Journal*, 2.
- MINAGRI. (2021). Informe sobre agricultura ecológica en Matanzas.
- Mohinuzzaman, M., Yuan, J., Yang, X., Senesi, N., Li, S.-L., Ellam, R. M., Mostofa, K. M., y Liu, C.-Q. J. S. o. T. T. E. (2020). Insights into solubility of soil humic substances and their fluorescence characterisation in three characteristic soils. 720, 137395.

- Montgomery, D. C. (2017). *Design and Analysis of Experiments* (I. John Wiley & Sons, Ed. Ninth Edition ed.).
- Montoneri, E., Boffa, V., Quagliotto, P., Mendichi, R., Chierotti, M. R., Gobetto, R., y Medana, C. (2008). Humic acid-like matter isolated from green urban wastes. Part 1: structure and surfactant properties. *BioResources*, 3(1), 123-141.
- Mosa, A. A., Taha, A., y Elsaied, M. (2020). Agro-environmental applications of humic substances: A critical review. *Egyptian Journal of Soil Science*, 60(3), 207-220. <https://doi.org/10.21608/ejss.2020.27425.1351>
- Olk, D. C., Bloom, P. R., Perdue, E. M., McKnight, D. M., Chen, Y., Farenhorst, A., Senesi, N., Chin, Y.-P., Schmitt-Kopplin, P., Hertkorn, N., y Harir, M. (2019). Environmental and Agricultural Relevance of Humic Fractions Extracted by Alkali from Soils and Natural Waters. *Journal Environmental Quality*, 48, 217-232.
- Ortiz, C. R. (2020). *Prácticas para la mejora en el proceso de compostaje de abonos orgánicos elaborados a base de estiércol y su efecto en el suelo: Revisión de literatura*
- Oyedeko, K., Agbetan, G., y Akinyemi, O. J. S. (2020). SYNTHESIS OF SCALE INHIBITORS FROM PINEAPPLE LEAF FIBER EXTRACT (ANANAS COMOSUS). 5(1), 32-40.
- Pedroso, I. (2007). *Propuesta de una tecnología de extracción de ácidos húmicos, para su uso como fertilizante* [Tesis en opción al grado de Máster en Contaminación ambiental, Universidad de matanzas].
- Pedroso, I., González, L. Y., y Luis, J. (2021). Determinación de las condiciones óptimas del proceso de extracción de ácido humico a partir de la cachaza. *Centro Azúcar*, 48(4).
- Pedroso, I., González, L. Y., Luis, J., Pérez, L., Vandecasteele, C., y Van Caneghem, J. (2022). Extraction yield of humic substances from organic materials. *DYNA*, 89(223), 107-113.
- Perry, R. H., y Green, D. W. (2008). *Perry's Chemical Engineers Handbook*. (McGraw-Hill, Ed. 8th Ed. ed.).
- Raposo, J. C., Villanueva, U., Olivares, M., y Madariaga, J. M. (2016). Determination of humic substances in sediments by focused ultrasound extraction and ultraviolet visible spectroscopy. *Microchemical Journal*, 128, 26-33.
- Reyes, J. J., Abasolo, F., Yépez, Á. J., Luna, R., Zambrano, D., Vázquez, V. F., Cabrera, D. A., Guzmán, J. A., Torres, J. A., y Rodríguez, W. O. (2017). Ácidos húmicos y su efecto sobre variables morfométricas en plantas de zanahoria (*Daucus carota L.*). *Biocencia*, XIX(2), 25-29.

- Roba, C. A., Jimenez, C., Baciú, C., Beldean-Galea, S., Levei, E., y Cordoş, E. (2011). Assessment of different sorbents efficiency for solid phase extraction of aquatic humic acids. *Central European Journal of Chemistry*, 9(4), 598-604.
- Rosabal, J. M. V., y Valle, M. M. (2006). *Hidrodinámica y Separaciones Mecánicas* (F. Varela, Ed. Tercera ed., Vol. III).
- Saito, B., y Seckler, M. M. (2014). Alkaline extraction of humic substances from peat applied to organic-mineral fertilizer production. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 31(3), 675-682.
- Scaglia, B., Baglieri, A., Tambone, F., Gennari, M., y Adani, F. (2016). Chlorpyrifos-methyl solubilisation by humic acids used as bio-surfactants extracted from lignocelluloses and kitchen wastes. *Chemosphere*, 159, 208-213.
- Scaglia, B., Rachide, R., Oliveira, M. O., Tambone, F., y Adani, F. (2016). Investigating organic molecules responsible of auxin-like activity of humic acid fraction extracted from vermicompost. *Science of the Total Environment*, 562, 289-295.
- Schwartz, N. N., Townships, L., y County, M. (1968). *Production of humic acid* 3,398,186).
- Shen, J., Gagliardi, S., McCoustra, M. R. S., y Arrighi, V. (2016). Effect of humic substances aggregation on the determination of fluoride in water using an ion selective electrode. *Chemosphere*, 159, 66-71.
- Steelink, C. (1985). Implication of elemental characterization of humic substances. En W.-I. N. York (Ed.), *Humic Substances in Soil, Sediment, and Water: Geochemistry, Isolation and Characterization* (pp. 457-476).
- Stevenson, F. J., y Goh, K. M. (1971). Infrared spectra of humic aids and related substances. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 35, 471-488.
- Suddarth, S. R., Ferreira, J. F., Cavalcante, L. F., Fraga, V. S., Anderson, R. G., Halvorson, J. J., Bezerra, F. T., Medeiros, S. A., Costa, C. R., y Dias, N. S. J. J. o. E. Q. (2019). Can humic substances improve soil fertility under salt stress and drought conditions? , 48(6), 1605-1613.
- Sun, Q., Liu, J., Huo, L., Li, Y. C., Li, X., Xia, L., Zhou, Z., Zhang, M., y Li, B. (2020). Humic acids derived from Leonardite to improve enzymatic activities and bioavailability of nutrients in a calcareous soil. *International Journal of Agricultural Biological Engineering*, 13(3), 200-205. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20201303.5660>
- Susic, M. (2016). Replenishing Humic Acids in Agriculture Soils. *Agronomy*, 6, 45-53.

- Tadini, A. M., Nicolodelli, G., Mounier, S., Montes, C. R., y Pereira, D. M. (2015). The importance of humin in soil characterisation: A study on Amazonian soils using different fluorescence techniques. *Science of the Total Environment*, 537, 152-158.
- Tan, K. H. (1998). *Humic matter*. In: *Principles of Soil Chemistry* (Tercera, Ed.).
- TERSAINOX, S. A. (2012). *Aceros para Ácido Sulfúrico*. (Ed. 63 ed.).
- Thurman, E. M. (1985). *Organic Geochemistry of Natural Waters*.
- Tortosa Muñoz, G. (2011). Elaboración a escala preindustrial de enmiendas y abonos orgánicos sólidos y líquidos mediante co-compostaje de orujo de oliva de dos fases o “alperujo”. *Proyecto de investigación*.
- Tsuda, K., Mori, H., Asakawa, D., Yanagi, Y., Kodama, H., Nagao, S., Yonebayashi, K., y Fujitake, N. (2014). Characterization and grouping of aquatic fulvic acids isolated from clear-water rivers and lakes in Japan. *Water Research*, 44, 3837-3846.
- Turton, R., Shaeiwitz, J. A., y Bhattacharyya, D. (2018). *Analysis, Synthesis, and Design of Chemical Processes* (Fifth Edition ed.).
- Ulrich. (1985). *Diseño y economía de los procesos en Ingeniería Química*.
- Valenzuela, E. I., y Cervantes, F. J. (2021). The role of humic substances in mitigating greenhouse gases emissions: Current knowledge and research gaps. *Science of the Total Environment*, 750, 141677. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141677>
- Vargas, C. (2016). *Utilización de las sustancias húmicas Comerciales para Optimizar la Fitorremediación de Suelos Mineros Usando Vetiveria (Chrysopogon zizanioides L. Roberty) y Verdolaga (Antriplex portulacoides L.)* [Tesis Doctoral, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos.].
- Veobides-Amador, H., Guridi-Izquierdo, F., y Vázquez-Padrón, V. (2018). Las sustancias húmicas como bioestimulantes de plantas bajo condiciones de estrés ambiental. *Cultivos Tropicales*, 39(4), 102-109.
- Verrillo, M., Cozzolino, V., Spaccini, R., y Piccolo, A. (2021). Humic substances from green compost increase bioactivity and antibacterial properties of essential oils in Basil leaves. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 8(1), 1-14. <https://doi.org/10.1002/jpln.202000525>
- Villagrán-Manilla, A., Ibarra-Coria, E., Guevara-Lara, A., y Nieto-Velázquez, S. (2020). Extracción y caracterización de un ácido húmico, y su evaluación fisicoquímica de coagulación en presencia de Fe³⁺ y Al³⁺. *Publicación anual*, 7(7), 62-67.
- Villagrán, A., Ibarra, E. D., Guevara, A., y Nieto, S. (2020). Extracción y caracterización de un ácido húmico, y su evaluación fisicoquímica de coagulación en presencia de

Fe³⁺ y Al³⁺. *Publicación anual, Tópicos de Investigación en Ciencias de la Tierra y Materiales*, 7(7), 62-67.

Walas, S. M. (1990). *Chemical Process Equipment: Selection and Design*. Boston. ButterworthHeinemann.

Walas, S. M. (2010). *Chemical Process Equipment. Butterworth-Heinemann, Heuristics in Chemical Engineering*. .

Wang, H., Wang, Y.-n., Li, X., Sun, Y., Wu, H., y Chen, D. (2016). Removal of humic substances from reverse osmosis (RO) and nanofiltration (NF) concentrated leachate using continuously ozone generation-reaction treatment equipment. *Waste Management*, 56, 271-279.

Weber, J. (2020). Humic Substances and their Role in the Environment. *EC Agriculture*, 03-08.

Wei, X., Yang, Y., Shen, Y., Chen, Z., Dong, Y., Wu, F., y Zhang, L. (2020). Effects of Litterfall on the Accumulation of Extracted Soil Humic Substances in Subalpine Forests *Frontiers in plant science*, 11, 254. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00254>

Weng, Y.-H., Wang, Y.-C., Tsai, Y.-T., Chuang, C.-J., Huang, C. P., y Li, K.-C. (2012). Effect of hydrophobicity of humic substances on electro-ultrafiltration. *Desalination*, 284, 128-134.

Wnuk, E., Waśko, A., Walkiewicz, A., Bartmiński, P., Bejger, R., Mielnik, L., y Bieganowski, A. (2020). The effects of humic substances on DNA isolation from soils. *PeerJ*, 8, e9378. <https://doi.org/10.7717/peerj.9378>

Xu, J., Zhao, B., Chu, W., Mao, J., y Zhang, J. (2017). Chemical nature of humic substances in two typical Chinese soils (upland vs paddy soil): A comparative advanced solid state NMR study. *Science of the Total Environment*, 576, 442-452.

Yang, Z., Du, M., y Jiang, J. (2016). Reducing capacities and redox potentials of humic substances extracted from sewage sludge. *Chemosphere*, 144, 902-908. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.09.037>

Zambrano, A. M. (2021). *Influencia de las sustancias húmicas en el desarrollo inicial de dos variedades de arroz, sometidas a estrés salino* [La Libertad: Universidad Estatal Península de Santa Elena].

Zavarzina, A. G., Demin, V. V., Nifant'eva, T. I., Shkinev, V. M., Danilova, T. V., y Spivakov, B. Y. (2002). Extraction of humic acids and their fractions in poly(ethylene glycol)-based aqueous biphasic systems. *ANALYTICA CHIMICA ACTA*, 452, 95-103.

- Zhang, A., Zhang, Y.-J., Zheng, H.-L., Ma, L.-L., Liu, W.-J., y Gong, G.-Q. (2018). Study on the extraction of fulvic acid from lignite by microwave-assisted hydrogen peroxide. *International Journal Oil, Gas and Coal Technology*, 18(1/2), 146-162.
- Zhang, S., Yuan, L., Li, W., Lin, Z., Li, Y., Hu, S., y Zhao, B. (2017). Characterization of pH-fractionated humic acids derived from Chinese weathered coal. *Chemosphere*, 166(334-342).
- Zularisam, A. W., Ismail, A. F., Salim, M. R., Sakinah, M., y Ozaki, H. (2017). The effects of natural organic matter (NOM) fractions on fouling characteristics and flux recovery of ultrafiltration membranes. *Desalination*, 202, 191-208.

ANEXOS

ANEXO 1. Resultados del diseño experimental para las dos metodologías de extracción de AH aplicadas

Tabla 1. Resultados experimentales para diferentes tipos de extractantes

Alt.	EB	V (SH) (mL)	m (H) (g)	EA	V (EA) (mL)	V (AF) (mL)	m (AH) (g)
1	NaOH	28,00	22,03	H ₂ SO ₄	0,80	21,00	1,70
2	NaOH	27,00	23,15	HCl	0,40	23,00	1,80
3	KOH	28,00	22,40	H ₂ SO ₄	0,20	19,00	1,22
4	KOH	27,00	27,21	HCl	0,30	23,00	1,23

Tabla 2, Flujos y costo de cada producto para producir 1 kg/h de ácido húmico

Alt,	EB		EA		H ₂ O		AH	
	W	CM	W	CM	W	CM	W	VP
1	1,17	0,09	0,43	0,10	23,67	0,04	1,70	19,67
2	1,11	0,08	0,13	0,01	11,19	0,02	1,80	20,75
3	3,74	2,80	0,15	0,13	8,56	0,01	1,22	14,05
4	3,02	2,26	0,12	0,01	10,01	0,02	1,51	17,40

Leyenda: w: cantidad de cada material consumido, kg/kg AH; CM: costo de los extractantes y el agua (\$/kg AH); VP: valor de la venta de AH, \$/kg AH

ANEXO 2. Análisis de varianza para los parámetros que caracterizan las diferentes fuentes de ácido húmico

Contenido de humedad					
Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	Fisher	p
Entre grupos	1701,59	3	567.197	2356,88	0,0000
Dentro del grupo	0,1902	8	0,0238		
Total (corregido)	1701,78	11			
Contenido de materia orgánica					
Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	Fisher	p
Entre grupos	2912,34	3	970,781	2267,65	0,0000
Dentro del grupo	3,4248	8	0,4281		
Total (corregido)	2915,77	11			
Contenido de Fósforo					
Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	Fisher	p
Entre grupos	0,0039	3	0,0013	3,15	0,0865
Dentro del grupo	0,0033	8	0,0004		
Total (corregido)	0,0072	11			
Contenido de Potasio					
Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	Fisher	p
Entre grupos	0,0017	3	0,00059	0,96	0,4557
Dentro del grupo	0,0049	8	0,00061		
Total (corregido)	0,066	11			
Contenido de Sodio					
Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	Fisher	p
Entre grupos	0,00063	3	0,00021	1,81	0,2234
Dentro del grupo	0,00093	8	0,00012		
Total (corregido)	0,00156	11			
Contenido de Calcio					
Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	Fisher	p
Entre grupos	0,9079	3	0,3026	0,89	0,4878
Dentro del grupo	2,7283	8	0,3410		
Total (corregido)	3,6352	11			
Contenido de Magnesio					
Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	Fisher	p
Entre grupos	0,0046	3	0,0015	3,65	0,0637
Dentro del grupo	0,0033	8	0,0004		
Total (corregido)	0,0079	11			
<i>GL: Grados de libertad, p: Valor de probabilidad</i>					

Anexo 3. Diseño experimental para las condiciones operacionales del proceso de extracción de ácido húmico

Eperimento	S/L (g/mL)	t_{EB} (h)	t_{EA} (h)
1	1/10	2	8
2	1/10	8	8
3	1/15	12	12
4	1/10	14	8
5	1/5	4	12
6	1/15	4	4
7	1/5	12	12
8	1/10	8	14
9	1/4	8	8
10	1/5	4	4
11	1/15	12	4
12	1/20	8	8
13	1/5	12	4
14	1/10	8	8
15	1/15	4	12
16	1/10	8	2

Anexo 4. Resultados experimentales, para la materia prima cachaza

Exp.	S/L (g/mL)	t _{EB} (h)	t _{EA} (h)	m _{cachaza} (g)	m _{NaOH} (kg)	m _H (g)	m _{SH} (g)	m _{H₂SO₄} (g)	m _{H₂O} (g)	m _{AH} (kg)	m _{AF} (g)	% EMO AH (%)
1	1/10	2	8	49,8	7,50	94,96	228,01	0,17	37,75	0,034	209,61	8,63
2	1/10	8	8	49,8	7,50	81,93	243,48	0,46	37,75	0,045	239,75	15,33
3	1/15	12	12	49,8	11,25	75,17	403,53	0,45	41,47	0,043	401,43	13,05
4	1/10	14	8	49,8	7,50	79,64	243,31	0,31	37,75	0,046	225,78	14,79
5	1/5	4	12	99,6	7,50	149,14	207,57	0,46	68,00	0,063	186,09	10,88
6	1/15	4	4	49,8	11,25	99,83	382,89	0,40	41,47	0,066	363,21	11,98
7	1/5	12	12	99,6	7,50	145,63	211,18	0,25	68,00	0,074	159,51	14,19
8	1/10	8	14	49,8	7,50	80,44	241,38	0,29	37,75	0,043	224,24	14,51
9	1/4	8	8	99,6	6,00	102,43	185,61	0,20	66,55	0,08	124,23	12,69
10	1/5	4	4	99,6	7,50	147,43	208,29	0,25	68,00	0,057	174,24	9,53
11	1/15	12	4	49,8	11,25	74,19	403,2	0,48	41,47	0,045	401,43	12,57
12	1/20	8	8	33,2	7,50	38,44	369,5	0,41	27,65	0,04	366,66	14,63
13	1/5	12	4	99,6	7,50	146,49	210,74	0,16	68,00	0,066	159,06	11,18
14	1/10	8	8	49,8	7,50	81,43	241,43	0,47	37,75	0,045	238,74	15,39
15	1/15	4	12	49,8	11,25	103,70	388,37	0,37	41,47	0,054	366,73	12,43
16	1/10	8	2	49,8	7,50	80,10	239,58	0,32	37,75	0,046	222,65	12,41

Anexo 5. Tabla ANOVA para el % de extracción de MO en el AH, a partir de la cachaza como materia prima

Tabla 1. Tabla ANOVA

EFECTO	SC	GL	CM	FISHER	PROBABILIDAD
A: S/L	2,4876	1	2,4876	2,16	0,1922
B: Tiempo EB	19,1874	1	19,1874	16,65	0,0065
C: Tiempo EA	6,6610	1	6,6610	5,78	0,0530
AA	2,0426	1	2,0426	1,77	0,2315
AB	0,3513	1	0,3513	0,30	0,6008
AC	1,2854	1	1,2854	1,12	0,3316
BB	19,7344	1	19,7344	17,12	0,0061
BC	0,3570	1	0,3570	0,31	0,5980
CC	5,7103	1	5,7103	4,95	0,0677
Error	6.9156	6	1,1526		
Total (corr.)	60,7324	15			

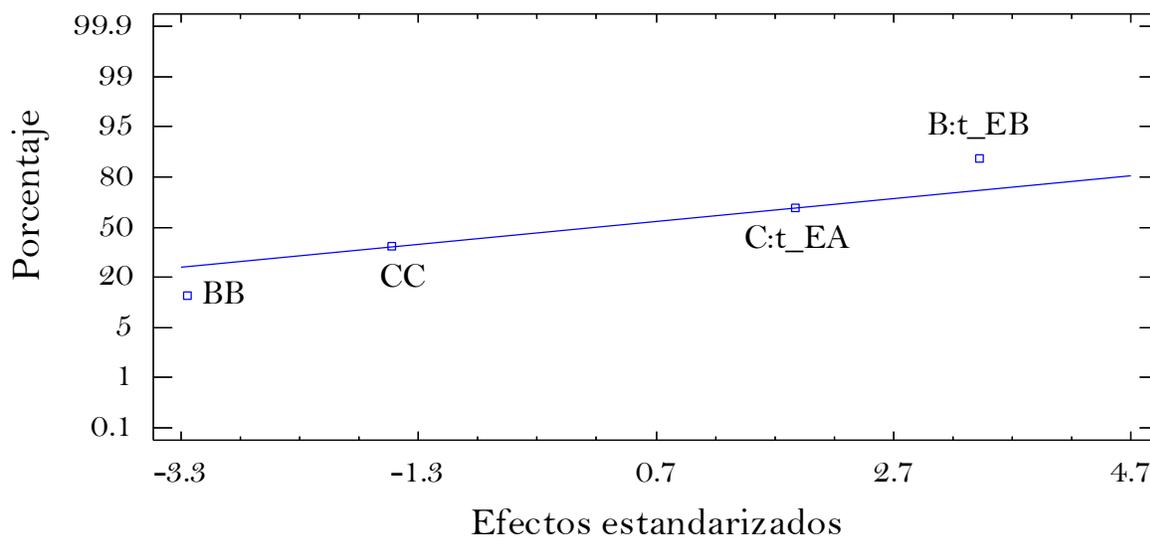


Figura 1. Probabilidad normal para el porcentaje de extracción de materia orgánica en el ácido húmico, a partir de la cachaza

Anexo 6. Resultados del análisis de regresión para obtener los modelos matemáticos que predigan las cantidades de materias primas, materiales auxiliares, producto y subproductos, para la cachaza

- Consumo de cachaza

Parámetro	Estimado	Error estándar	t-student	Valor p
Constante	17,1712	5,6564	3,0357	0,0096
S/L	381,041	28,9778	13,1494	0,0000
t _{EB}	0,0	0,5001	0,0	1,0000

Análisis de Varianza

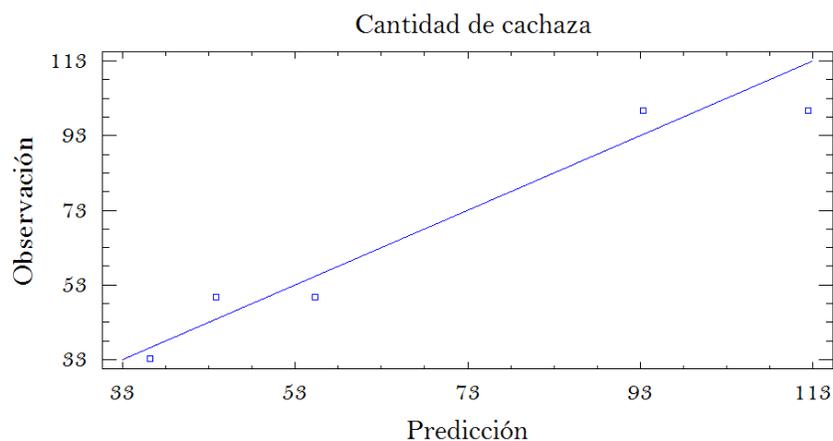
Fuente	SC	GL	CM	Fisher	Valor p
Modelo	8649,81	3	4324,91	86,45	0,0000
Residual	650,335	12	50,0258		
Total (Corr.)	9300,15	15			

R-cuadrado = 93,01 %

Error medio absoluto = 6,09

Estadígrafo Durbin-Watson = 2,3518 (P=0,2605)

R-cuadrado predicción = 92,56 %



Anexo 6. Continuación

- Consumo de hidróxido de sodio

Parámetro	Estimado	Error estándar	t-student	Valor p
Constante	0,0957	0,0102	9,4145	0,0000
SL	0,2310	0,0731	3,1355	0,0073

Análisis de Varianza

Fuente	SC	GL	CM	Fisher	Valor p
Modelo	0,0032	1	0,0032	9,63	0,0073
Residual	0,0045	14	0,0003		

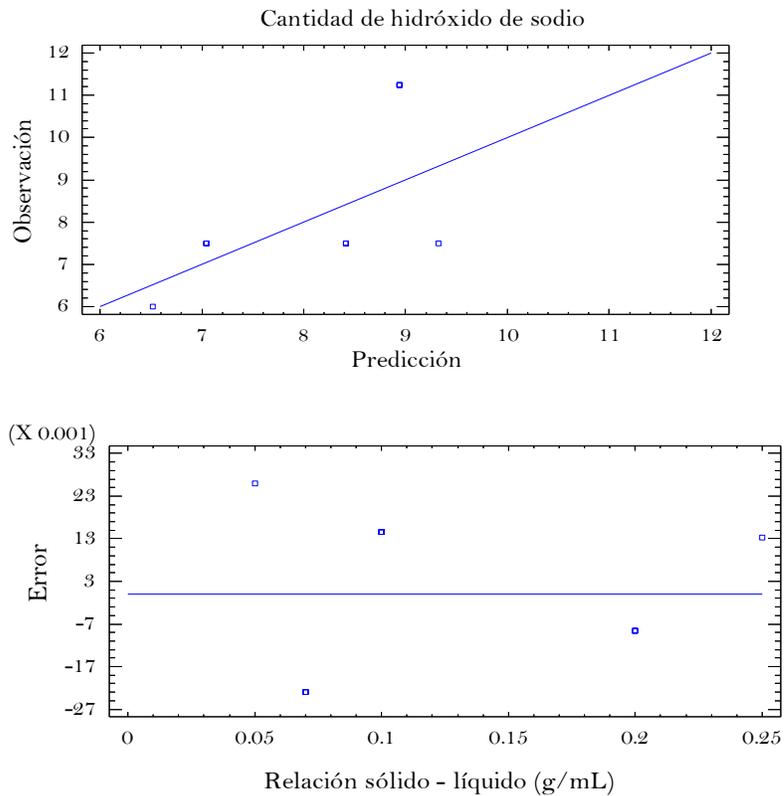
Total (Corr.) 47,11 15

R-cuadrado = 41,25 %

Error medio absoluto = 0,016

Estadígrafo Durbin-Watson = 2,6362 (P=0,1945)

R-cuadrado predicción = 75,5 %



Anexo 6. Continuación

- Humina producida

Parámetro	Estimado	Error estándar	t-student	Valor p
Constante	61,6441	16,4829	3,7399	0,0025
S/L	405,829	84,4426	4,8060	0,0003
t _{EB}	-1,632	1,4574	-1,1198	0,2831

Análisis de Varianza

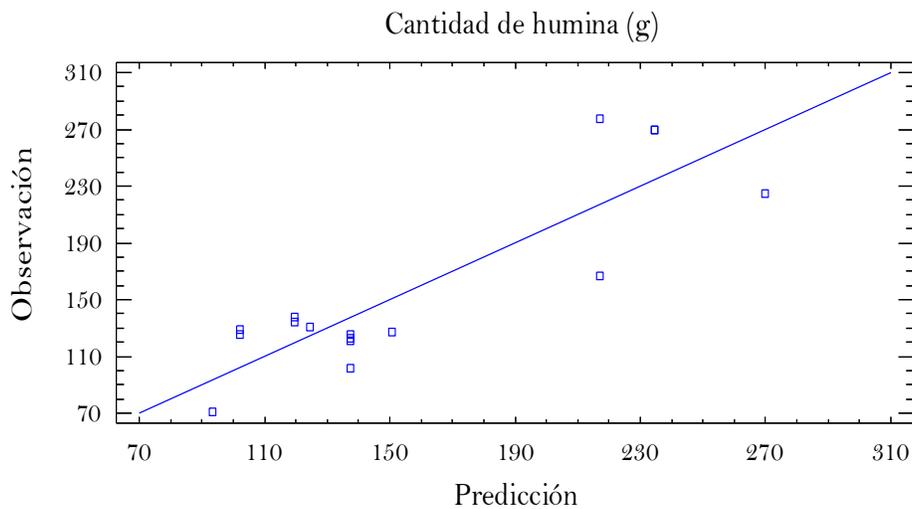
Fuente	SC	GL	CM	Fisher	Valor p
Modelo	10344,5	2	5172,25	12,18	0,0010
Residual	5522,43	13	424,802		
Total (Corr.)	15866,9	15			

R-cuadrado = 65,1954 %

Error medio absoluto = 1,3552

Estadígrafo Durbin-Watson = 2,3572 (P=0,2437)

R-cuadrado predicción = 90,33 %



Anexo 6. Continuación

- Sustancias húmicas producidas

Parámetro	Estimado	Error estándar	t-student	Valor p
Constante	387,508	44,7705	8,6554	0,0000
SL	-988,449	229,362	-4,3096	0,0008
t _{EB}	1,2896	3,9586	0,32577	0,7498

Análisis de Varianza

Fuente	SC	GL	CM	Fisher	Valor p
Modelo	58539,3	2	29269,6	9,34	0,0031
Residual	40742,7	13	3134,05		

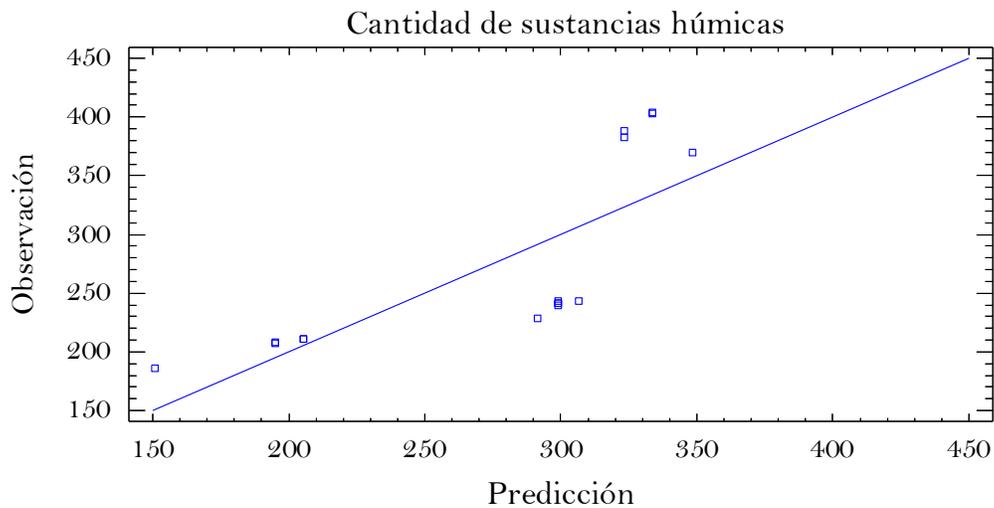
Total (Corr.) 99282,0 15

R-cuadrado = 58,9626 %

Error medio absoluto = 4,5863

Estadígrafo Durbin-Watson = 2,3929 (P=0,2883)

R-cuadrado predicción = 82,22 %



Anexo 6. Continuación

- Consumo de ácido sulfúrico

Parámetro	Estimado	Error estándar	t-student	Valor p
Constante	0,2873	0,0665	4,3182	0,0010
S/L	-0,7616	0,2782	-2,7374	0,0180
t _{EB}	0,011	0,0048	2,2907	0,0409
t _{EA}	0,0044	0,0048	0,9163	0,3776

Análisis de Varianza

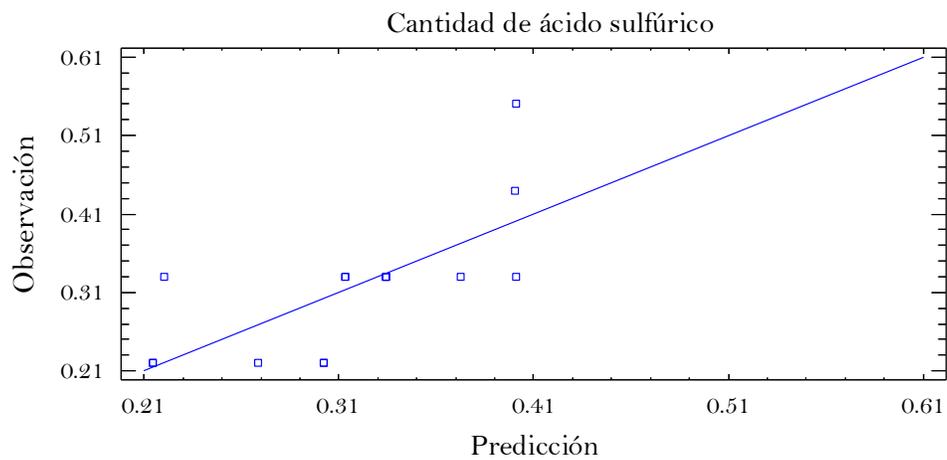
Fuente	SC	GL	CM	Fisher	Valor p
Modelo	0,0626	2	0,0209	4,53	0,0241
Residual	0,0553	13	0,0046		
Total (Corr.)	0,1180	15			

R-cuadrado = 53,10 %

Error medio absoluto = 0,045

Estadígrafo Durbin-Watson = 1,7023 (P=0,2837)

R-cuadrado predicción = 78,43 %



Anexo 6. Continuación

- Consumo de agua

Parámetro	Estimado	Error estándar	t-student	Valor p
Constante	20,8077	5,6578	3,6777	0,0032
SL	214,978	23,6637	9,0847	0,0000
EB	0,0	0,4084	0,0	1,0000
EA	0,0	0,4084	0,0	1,0000

Análisis de Varianza

Fuente	SC	GL	CM	Fisher	Valor p
Modelo	2753,3	3	3,6777	27,51	0,0000
Residual	400,322	12	9,0847		

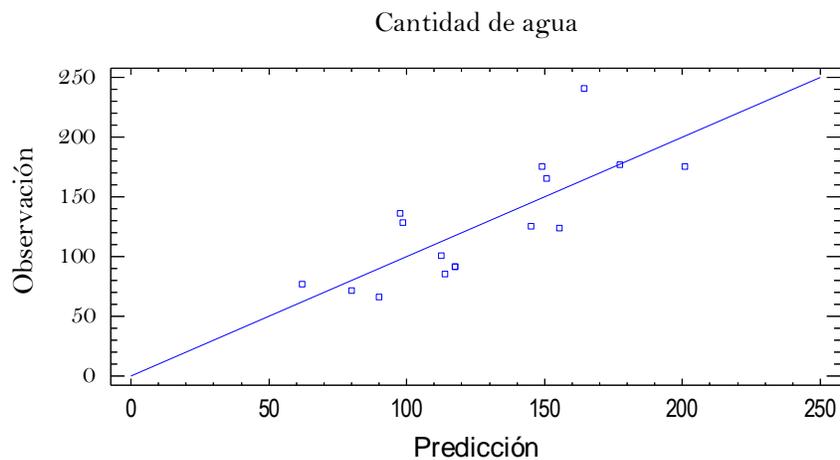
Total (Corr.) 3153,62 15

R-cuadrado = 83,31 %

Error medio absoluto = 4,9052

Estadígrafo Durbin-Watson = 2,4145 (P=0,2083)

R-cuadrado predicción = 89,17 %



Anexo 6. Continuación

- Ácido fúlvico producido

Parámetro	Estimado	Error estándar	t-student	Valor p
Constante	146,621	43,5627	-3,3625	0,0056
SL	-1025,6	182,212	-5,6285	0,0001
EB	8,38	3,1448	2,6647	0,0206
EA	7,59	3,1448	2,4138	0,0327

Análisis de Varianza

Fuente	SC	GL	CM	Fisher	Valor p
Modelo	88233,3	3	29411,1	14,87	0,0002
Residual	23735,6	12	1977,7		

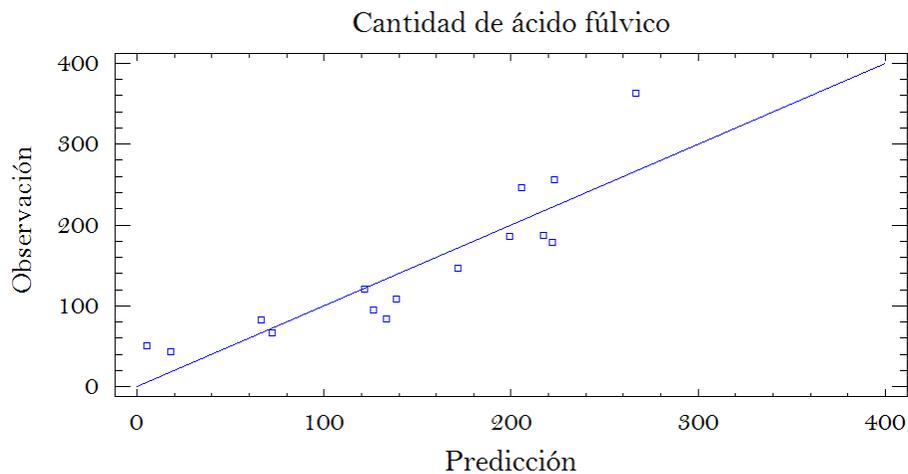
Total (Corr.)	111969,0	15			
---------------	----------	----	--	--	--

R-cuadrado = 78,80 %

Error medio absoluto = 4,47

Estadígrafo Durbin-Watson = 2,0068 (P=0,4930)

R-cuadrado predicción = 88,12 %



Anexo 6. Continuación

- Ácido húmico producido

Parámetro	Estimado	Error estándar	t-student	Valor p
Constante	5,5654	0,0026	2103,67	0,0000
SL	0,0080	0,0110	0,7219	0,4842
EB	1,3889	0,0002	7285,86	0,0000
EA	1,3889	0,0002	7285,86	0,0000

Análisis de Varianza

Fuente	SC	GL	CM	Fisher	Valor p
Modelo	771,617	3	257,21	0,97	0,0000
Residual	$8,83 \cdot 10^{-5}$	12	$7,27 \cdot 10^{-6}$		

Total (Corr.) 771,617 15

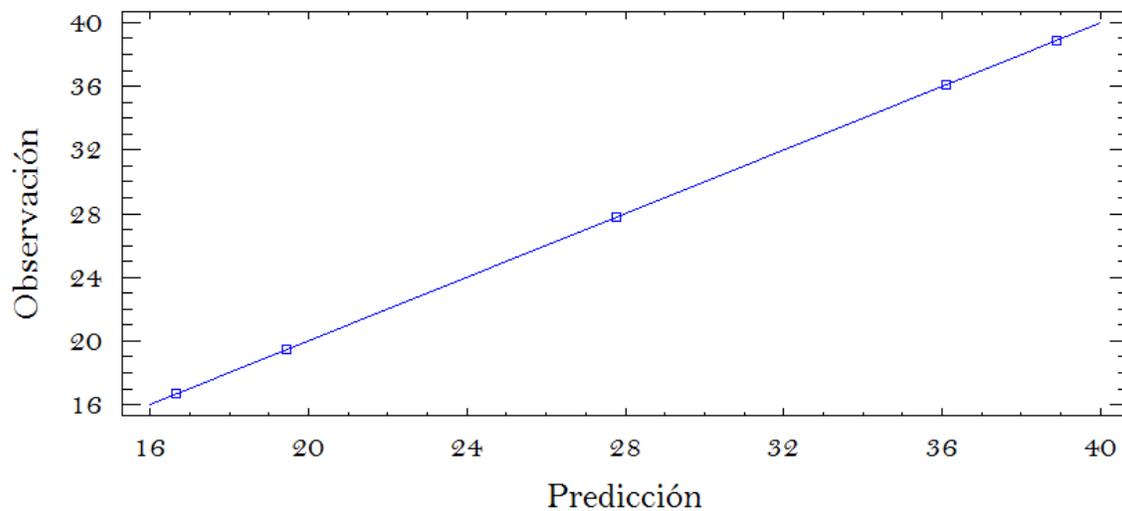
R-cuadrado = 100,00 %

Error medio absoluto = 0,0019

Estadígrafo Durbin-Watson = 1,5176 (P=0,1697)

R-cuadrado predicción = 96,72 %

Cantidad de ácido húmico

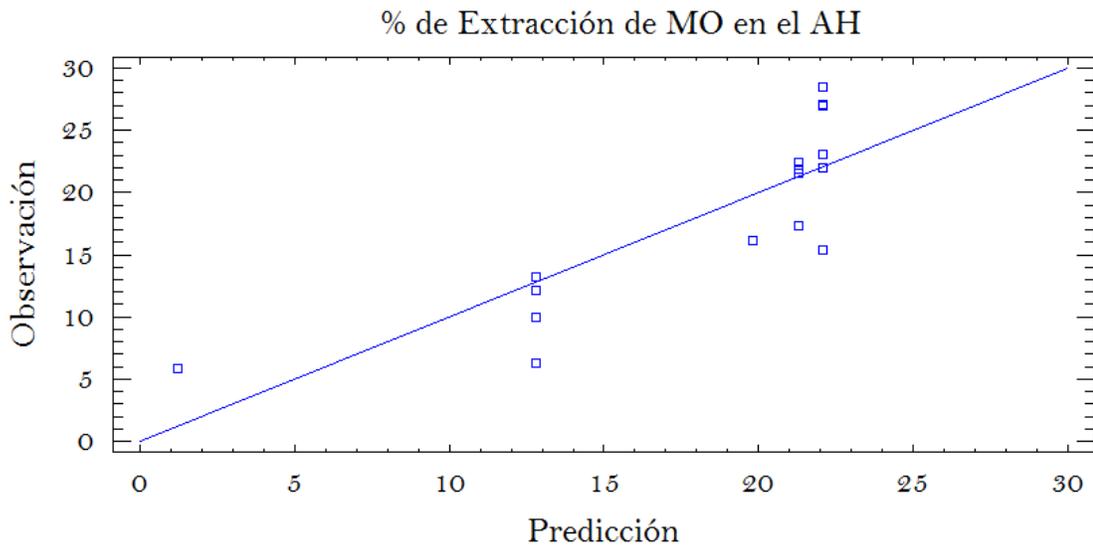


Anexo 7. Resultados experimentales para la materia prima estiércol de ganado vacuno

Exp.	S/L (g/mL)	t _{EB} (h)	t _{EA} (h)	m estiércol (g)	m _{NaOH} (g)	m _H (g)	m _{SH} (g)	m _{H₂SO₄} (g)	m _{H₂O} (g)	m _{AH} (g)	m _{AF} (g)	% EMO AH (%)
1	1/10	2	8	43,5	7,50	127,50	195,6	0,22	0,071	9,493	209,61	15,41
2	1/10	8	8	43,5	7,50	121,20	202,9	0,33	0,092	10,813	239,75	27,04
3	1/15	12	12	43,5	11,25	125,10	326,4	0,55	0,178	11,847	401,43	22,42
4	1/10	14	8	43,5	7,50	131,00	188,1	0,44	0,124	10,736	225,78	23,04
5	1/5	4	12	87,0	7,50	269,90	86,1	0,22	0,165	5,863	186,09	9,99
6	1/15	4	4	43,5	11,25	138,00	332,2	0,33	0,077	11,363	363,21	17,38
7	1/5	12	12	87,0	7,50	277,50	86,9	0,22	0,175	7,733	159,51	12,18
8	1/10	8	14	43,5	7,50	125,00	199,8	0,33	0,126	10,296	224,24	28,47
9	1/4	8	8	87,0	6,00	225,10	70,8	0,33	0,180	4,51	124,23	5,86
10	1/5	4	4	87,0	7,50	269,80	87,6	0,22	0,085	6,82	174,24	13,25
11	1/15	12	4	43,5	11,25	129,00	291,4	0,33	0,102	14,311	401,43	21,82
12	1/20	8	8	29,0	7,50	70,70	335,8	0,33	0,135	6,688	366,66	16,12
13	1/5	12	4	87,0	7,50	166,60	85,8	0,22	0,241	4,004	159,06	6,34
14	1/10	8	8	43,5	7,50	102,00	202,9	0,33	0,092	10,868	238,74	27,04
15	1/15	4	12	43,5	11,25	134,60	332,7	0,33	0,129	11,286	366,73	21,57
16	1/10	8	2	43,5	7,50	122,50	202,4	0,33	0,067	10,461	222,65	22,00

Anexo 8. Tabla ANOVA para el % de extracción de MO en el AH, a partir del estiércol de ganado vacuno como materia prima

EFEECTO	SC	GL	CM	FISHER	PROBABILIDAD
A: S/L	160,0130	1	160,0130	10,12	0,0191
B: Tiempo EB	5,1304	1	5,1304	0,32	0,5897
C: Tiempo EA	19,3090	1	19,3090	1,22	0,3115
AA	136,9950	1	136,9950	8,66	0,0258
AB	21,6916	1	21,6916	1,37	0,2860
AC	1,9267	1	1,9267	0,12	0,7390
BB	78,8144	1	78,8144	4,98	0,0671
BC	3,7950	1	3,7950	0,24	0,6416
CC	3,3421	1	3,3421	0,21	0,6619
Error	94,8978	6	15,8163		
Total (corrigo)	774,9520	15			



Anexo 9. Resultados del análisis de regresión para obtener los modelos matemáticos que predigan las cantidades de materias primas, materiales auxiliares, producto y subproductos, para el estiércol de ganado vacuno

- Consumo de estiércol de ganado vacuno

Parámetro	Estimado	Error estándar	t-student	Valor p
Constante	10,3441	4,3442	2,3812	0,0347
SL	229,543	18,1693	12,6335	0,0000
EB	0,0000	0,3136	0,0000	1,0000
EA	0,0000	0,3136	0,0000	1,0000

Análisis de Varianza

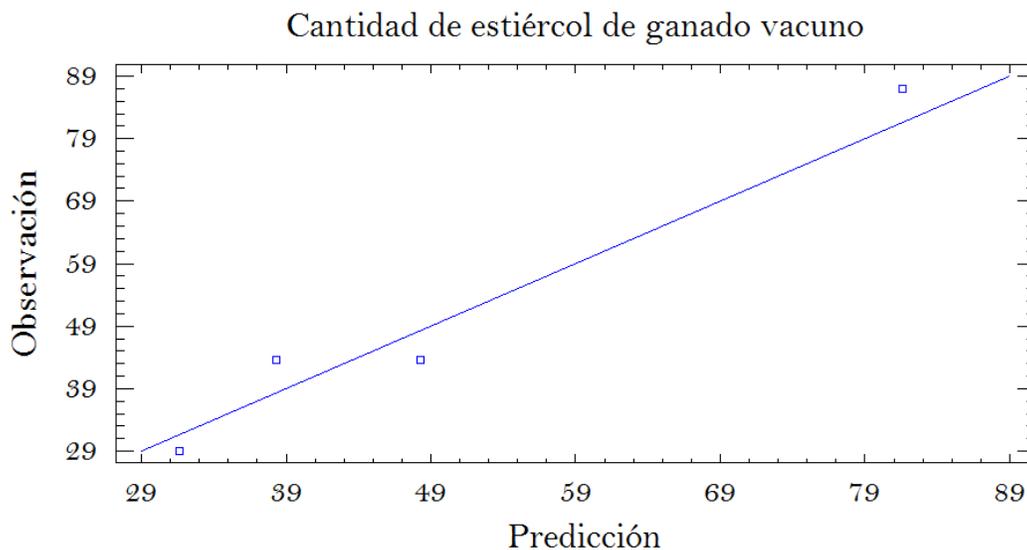
Fuente	SC	GL	CM	Fisher	Valor p
Modelo	3138,99	3	1046,33	53,20	0,0000
Residual	236,005	12	19,671		
Total (Corr.)	3375,00	15			

R-cuadrado = 93,01 %

Error medio absoluto = 3,6677

Estadígrafo Durbin-Watson = 2,3318 (P=0,2605)

R-cuadrado predicción = 94,17 %



Anexo 9. Continuación

- Consumo de hidróxido de sodio

Parámetro	Estimado	Error estándar	t-student	Valor p
Constante	0,0957	0,0102	9,4145	0,0000
SL	0,2310	0,0731	3,1355	0,0073

Análisis de Varianza

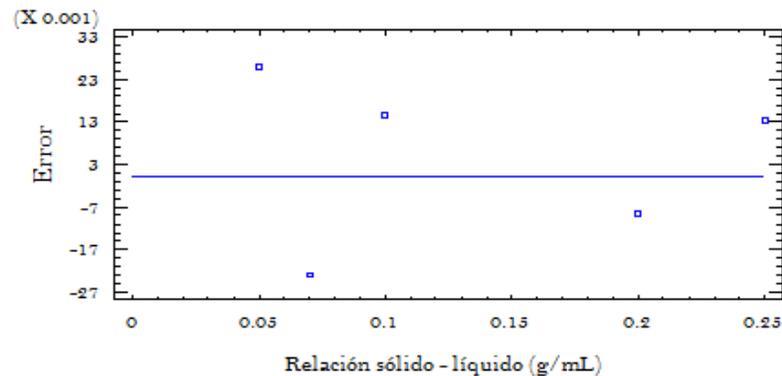
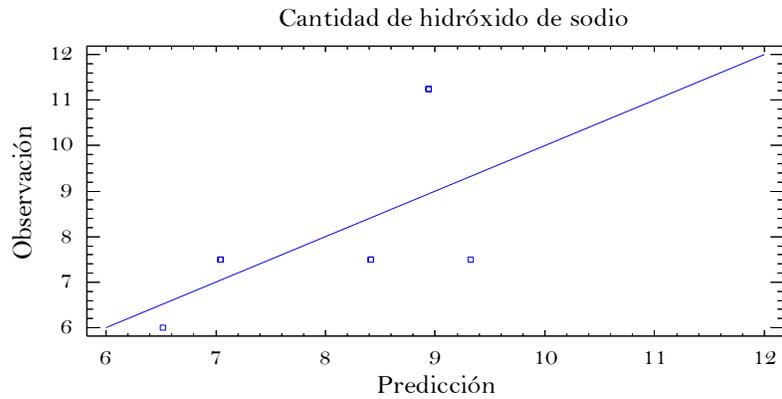
Fuente	SC	GL	CM	Fisher	Valor p
Modelo	0,0032	1	0,0032	9,63	0,0073
Residual	0,0045	14	0,0003		
Total (Corr.)	47,11	15			

R-cuadrado = 41,25 %

Error medio absoluto = 0,016

Estadígrafo Durbin-Watson = 2,6362 (P=0,1945)

R-cuadrado predicción = 76,12 %



Anexo 9. Continuación

- Humina producida

Parámetro	Estimado	Error estándar	t-student	Valor p
Constante	66,6423	27,6067	2,41399	0,0313
SL	882,768	141,431	6,24169	0,0000
EB	-2,177	2,4409	-0,89186	0,3887

Análisis de Varianza

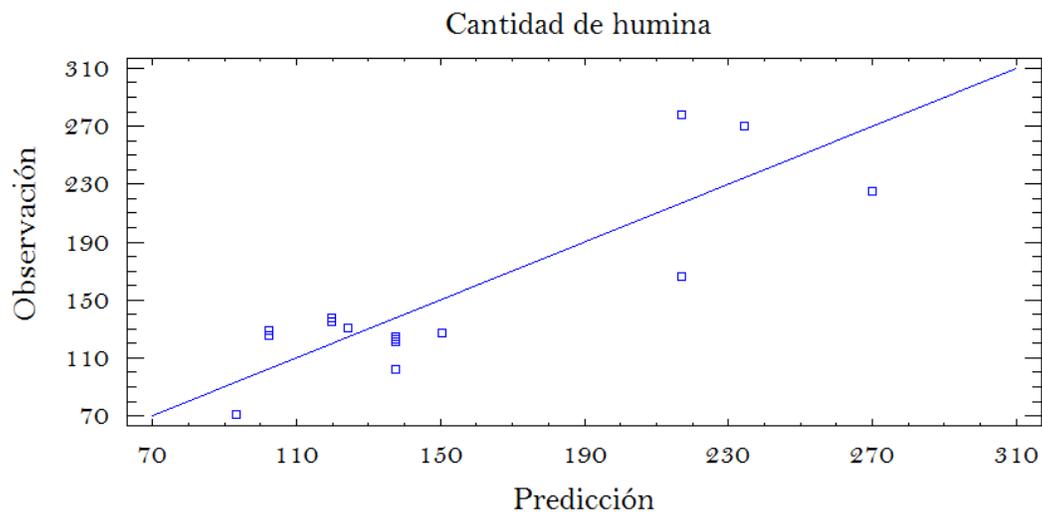
Fuente	SC	GL	CM	Fisher	Valor p
Modelo	47373,4	2	23686,7	19,88	0,0001
Residual	15491,6	13	1191,66		
Total (Corr.)	62865,0	15			

R-cuadrado = 75,3574 %

Error medio absoluto = 2,5415

Estadígrafo Durbin-Watson = 1,5791 (P=0,2042)

R-cuadrado predicción = 87,15 %



Anexo 9. Continuación

- Sustancias húmicas producidas

Parámetro	Estimado	Error estándar	t-student	Valor p
Constante	391,223	31,1966	12,5406	0,0000
SL	-1454,67	159,822	-9,1018	0,0000
EB	-1,187	2,7584	-0,4303	0,6740

Análisis de Varianza

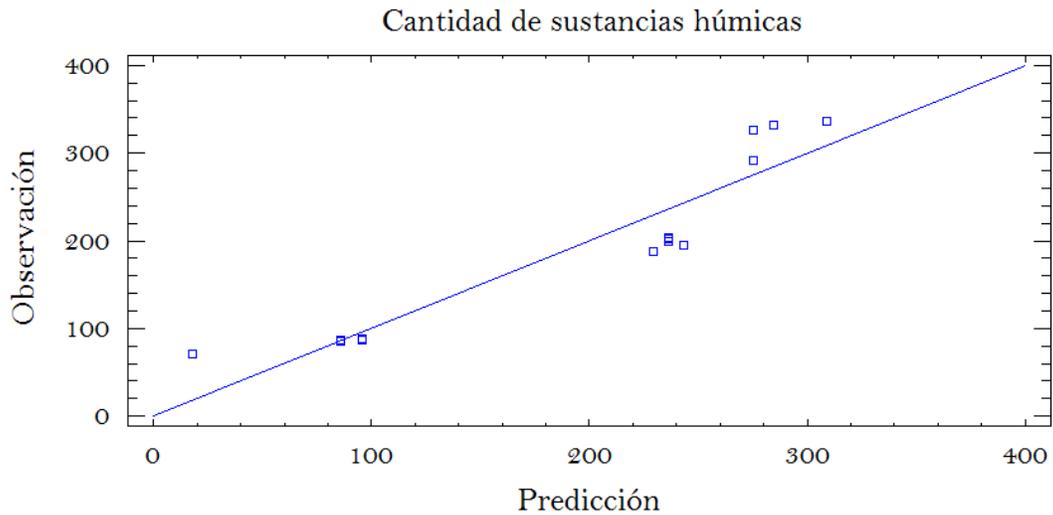
Fuente	SC	GL	CM	Fisher	Valor p
Modelo	126346,0	2	63172,9	41,51	0,0000
Residual	19782,5	13	1521,73		
Total (Corr.)	146128,0	15			

R-cuadrado = 86,4622 %

Error medio absoluto = 3,4369

Estadígrafo Durbin-Watson = 2,5854 (P=0,1186)

R-cuadrado predicción = 90,11 %



Anexo 9. Continuación

- Consumo de ácido sulfúrico

Parámetro	Estimado	Error estándar	t-student	Valor p
Constante	0,3225	0,0539	5,9752	0,0000
SL	-0,7616	0,2765	-2,7545	0,0164
EB	0,011	0,0048	2,3049	0,0383

Análisis de Varianza

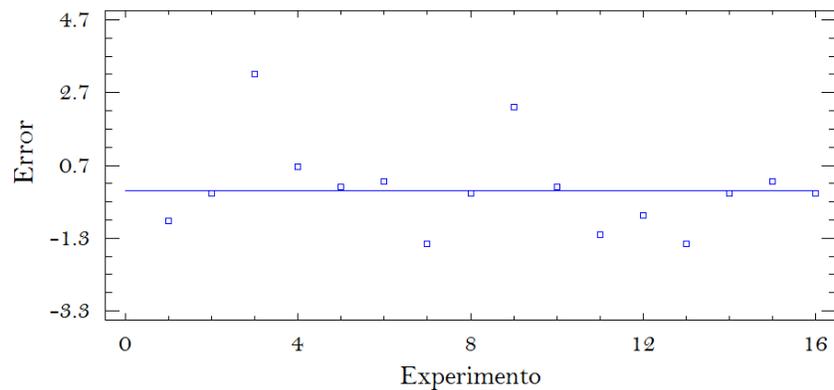
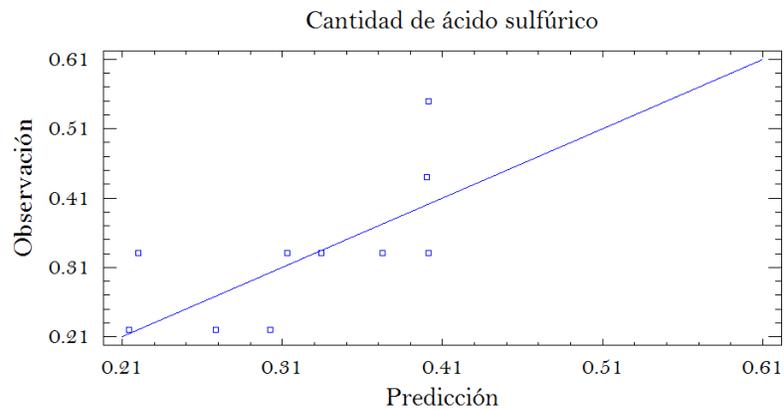
Fuente	SC	GL	CM	Fisher	Valor p
Modelo	0,0587	2	0,0294	6,45	0,0113
Residual	0,0592	13	0,0045		
Total (Corr,)	0,1180	15			

R-cuadrado = 49,8069 %

Error medio absoluto = 0,043

Estadígrafo Durbin-Watson = 1,5808 (P=0,2052)

R-cuadrado predicción = 75,20 %



Anexo 9. Continuación

- Consumo de agua

Parámetro	Estimado	Error estándar	t-student	Valor p
Constante	-0,0101	0,0339	-0,2979	0,7708
SL	0,4002	0,1416	2,8255	0,0153
EB	0,0064	0,0024	2,6138	0,0226
EA	0,00461	0,0024	1,8857	0,0838

Análisis de Varianza

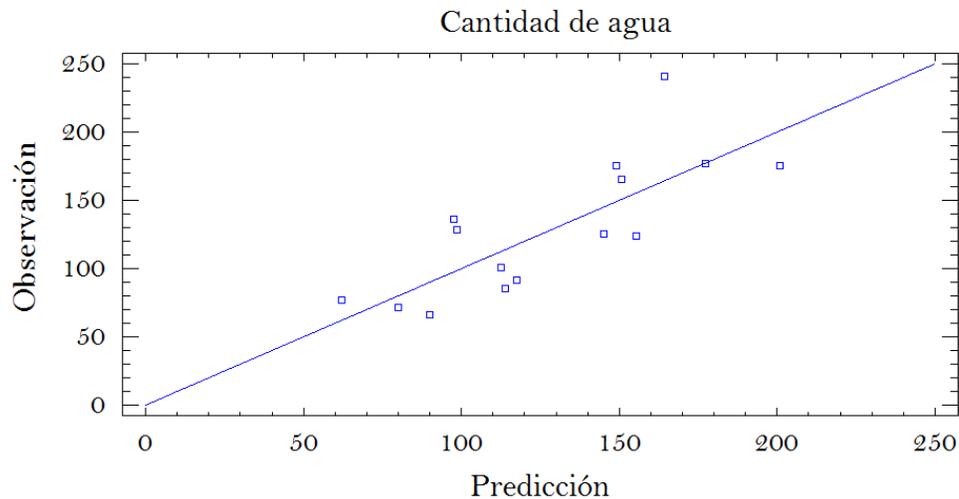
Fuente	SC	GL	CM	Fisher	Valor p
Modelo	0,0220	3	0,0073	6,12	0,0091
Residual	0,0143	12	0,0012		
Total (Corr.)	0,0363	15			

R-cuadrado = 60,4889 %

Error medio absoluto = 0,0253

Estadígrafo Durbin-Watson = 2,2863 (P = 0,2917)

R-cuadrado predicción = 80,10 %



Anexo 9. Continuación

- Ácido fúlvico producido

Parámetro	Estimado	Error estándar	t-student	Valor p
Constante	0,014	0,0003	4,5859	0,0004
SL	0,024	0,0024	10,92	0,0000

Análisis de Varianza

Fuente	SC	GL	CM	Fisher	Valor p
Modelo	0,000042	2	0,000042	102,60	0,0000
Residual	0,0000047	13	3,37 E-7		
Total (Corr.)	0,1180	15			

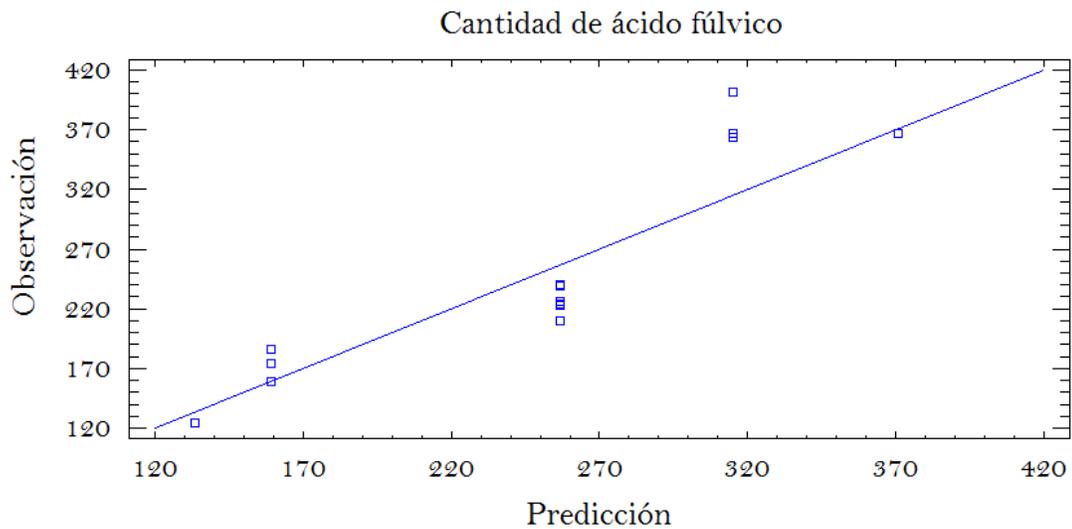
Coefficiente de correlación = 0,94

R-cuadrado = 87,99 %

Error medio absoluto = 0,0005

Estadígrafo Durbin-Watson = 1,9548 (P=0,4672)

R-cuadrado predicción = 88,43 %



Anexo 9. Continuación

- Ácido húmico producido

Parámetro	Estimado	Error estándar	t-student	Valor p
Constante	118.204	17.467	6.7673	0.0000
SL	-331.674	73.0552	-4.5400	0.0007
EB	0.805	1.2609	0.6384	0.5352
EA	-0.003	1.2609	-0.0024	0.9981

Análisis de Varianza

Fuente	SC	GL	CM	Fisher	Valor p
Modelo	6683.33	3	2227.78	7.01	0.0056
Residual	3815.46	12	317.955		

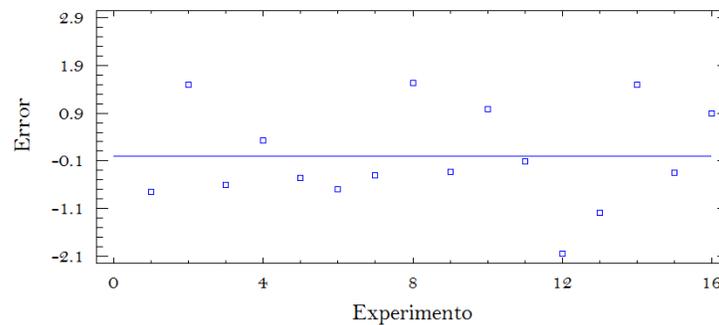
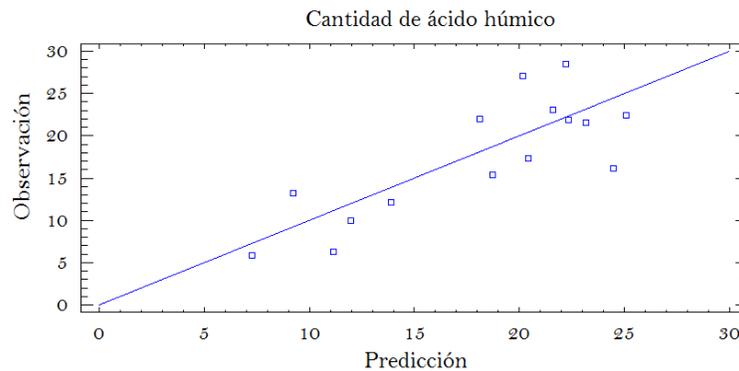
Total (Corr.)	10498.8	15			
---------------	---------	----	--	--	--

R-cuadrado = 63,6581 %

Error medio absoluto = 9,3911

Estadígrafo Durbin-Watson = 1,9476 (P=0,4704)

R-cuadrado predicción = 83,15 %



ANEXO 10. Resultados experimentales de la caracterización físico química de la cachaza y el porcentaje de extracción de MO en el AH, para diferentes condiciones de almacenamiento, durante 8 semanas

Semana	Condiciones de almacenamiento	MO (%)	Humedad (%)	Fósforo (mg/L)	Potasio (mg/L)	Sodio (mg/L)	Calcio (mg/L)	Magnesio (mg/L)	% EMO _{AH}
1	Bajo techo	80,27	57,56	0,77	0,65	0,14	3,96	1,75	6,75
	Intemperie	81,51	27,01	0,76	0,60	0,16	4,11	1,79	6,82
2	Bajo techo	69,53	69,57	0,78	0,69	0,16	3,92	1,81	12,93
	Intemperie	80,17	22,72	0,76	0,60	0,14	3,97	1,78	9,71
3	Bajo techo	77,63	16,76	0,75	0,61	0,15	3,96	1,82	40,33
	Intemperie	75,12	15,64	0,76	0,63	0,14	4,20	1,88	26,54
4	Bajo techo	76,18	14,88	0,76	0,60	0,16	4,11	1,73	18,36
	Intemperie	70,63	15,16	0,78	0,55	0,16	3,93	1,79	12,31
5	Bajo techo	72,2	10,54	0,76	0,58	0,15	3,91	1,84	17,16
	Intemperie	80,04	15,65	0,77	0,59	0,16	3,94	1,60	13,14
6	Bajo techo	78,78	32,5	0,75	0,59	0,14	3,97	1,88	18,5
	Intemperie	83,79	64,41	0,78	0,58	0,14	3,91	1,78	12,49
7	Bajo techo	78,00	13,36	0,77	0,56	0,16	4,38	1,75	13,46
	Intemperie	70,79	72,82	0,78	0,56	0,15	3,96	1,75	4,67
8	Bajo techo	74,29	32,3	0,75	0,60	0,14	4,13	1,76	21,81
	Intemperie	79,23	78,33	0,79	0,63	0,15	4,36	1,84	14,00

ANEXO 11. Resultados del Análisis de Varianza, de los parámetros de caracterización físico química de la cachaza, para diferentes condiciones de almacenamiento.

Contenido de humedad					
Fuente	SC	GL	CM	Fisher	p
Condición almacenamiento	12,96	1	12,96	0,63	0,4541
Tiempo almacenamiento	117,17	7	16,74	0,81	0,6052
Error	144,44	7	20,63		
Total (corregido)	274,57	15			
Contenido de materia orgánica					
Fuente	SC	GL	CM	Fisher	p
Condición almacenamiento	258,17	1	258,17	0,39	0,5530
Tiempo almacenamiento	4137,83	7	591,12	0,89	0,5598
Error	4655,92	7			
Total (corregido)	9051,92	15			
Contenido de Fósforo					
Fuente	SC	GL	CM	Fisher	p
Condición almacenamiento	0,0005	1	0,0005	2,64	0,1484
Tiempo almacenamiento	0,0005	7	0,00007	0,37	0,8950
Error	0,0013	7	0,00019		
Total (corregido)	0,0023	15			
Contenido de Potasio					
Fuente	SC	GL	CM	Fisher	p
Condición almacenamiento	0,0012	1	0,0012	1,41	0,2735
Tiempo almacenamiento	0,0119	7	0,0017	1,95	0,1982
Error	0,0061	7	0,0009		
Total (corregido)	0,0192	15			
Contenido de Sodio					
Fuente	SC	GL	CM	Fisher	p
Condición almacenamiento	0,0000	1	0,0000	0,00	1,0000
Tiempo almacenamiento	0,0006	7	0,00009	1,00	0,5000
Error	0,0006	7	0,00009		
Total (corregido)	0,0012	15			
Contenido de Calcio					
Fuente	SC	GL	CM	Fisher	p
Condición almacenamiento	0,0001	1	0,0001	0,00	0,9512
Tiempo almacenamiento	0,1860	7	0,0266	1,07	0,4670
Error	0,1743	7	0,0249		
Total (corregido)	0,3604	15			
Contenido de Magnesio					
Fuente	SC	GL	CM	Fisher	p
Condición almacenamiento	0,0011	1	0,0011	0,18	0,6831
Tiempo almacenamiento	0,0257	7	0,0037	0,63	0,7208
Error	0,0408	7	0,0058		
Total (corregido)	0,0676	15			
<i>SC: Suma de cuadrados, GL: Grados de libertad, CM: Cuadrado medio, p: Valor de probabilidad</i>					

ANEXO 12. Resultados experimentales de la caracterización físico química del estiércol de ganado vacuno y el porcentaje de extracción de MO en el AH, para diferentes condiciones de almacenamiento, durante 8 semanas

Semana	Condiciones de almacenamiento	MO (%)	Humedad (%)	Fósforo (mg/L)	Potasio (mg/L)	Sodio (mg/L)	Calcio (mg/L)	Magnesio (mg/L)	% EMO _{AH}
1	Bajo techo	77,36	66,00	0,79	1,94	0,52	2,94	1,47	80,10
	Intemperie	75,93	20,45	0,91	1,87	0,38	2,02	1,19	85,99
2	Bajo techo	70,15	70,05	0,85	2,16	0,56	3,34	1,34	57,83
	Intemperie	77,20	51,89	0,95	2,55	0,54	1,66	1,87	50,67
3	Bajo techo	78,32	27,33	0,84	1,09	0,46	1,66	0,69	22,40
	Intemperie	76,51	17,02	0,66	1,16	0,27	2,06	1,03	31,02
4	Bajo techo	77,41	14,19	0,92	1,14	0,38	2,93	1,23	37,92
	Intemperie	78,95	17,34	0,89	1,17	0,35	3,87	1,51	27,32
5	Bajo techo	80,63	13,73	0,77	1,45	0,24	2,44	0,58	43,27
	Intemperie	75,59	21,87	0,90	1,57	0,56	2,43	0,70	33,99
6	Bajo techo	74,29	17,49	0,95	2,95	0,32	3,87	0,79	47,56
	Intemperie	69,76	66,96	0,90	3,26	1,01	3,33	2,88	74,10
7	Bajo techo	72,50	15,00	0,72	0,67	0,30	2,60	0,83	26,39
	Intemperie	73,00	64,87	0,84	0,77	0,22	3,99	0,43	44,57
8	Bajo techo	77,21	14,59	0,71	1,86	0,47	3,28	0,82	45,61
	Intemperie	68,51	72,99	0,74	2,01	0,69	3,70	3,15	64,19

ANEXO 13. Resultados del Análisis de Varianza, de los parámetros de caracterización físico química del estiércol de ganado vacuno, para diferentes condiciones de almacenamiento

Contenido de humedad					
Fuente	SC	GL	CM	Fisher	p
Condición almacenamiento	564,1810	1	564,1810	0,81	0,3992
Tiempo almacenamiento	3443,7700	7	491,9680	0,70	0,6735
Error	4901,7800	7	700,2540		
Total (corregido)	8909,7310	15			
Contenido de materia orgánica					
Fuente	SC	GL	CM	Fisher	p
Condición almacenamiento	9,6410	1	9,6410	0,84	0,3889
Tiempo almacenamiento	96,4533	7	13,7790	1,21	0,4056
Error	79,9878	7	11,4628		
Total (corregido)	186,0823	15			
Contenido de Fósforo					
Fuente	SC	GL	CM	Fisher	p
Condición almacenamiento	0,0036	1	0,0036	0,59	0,4670
Tiempo almacenamiento	0,0796	7	0,0114	1,87	0,2143
Error	0,0426	7	0,0061		
Total (corregido)	0,1258	15			
Contenido de Potasio					
Fuente	SC	GL	CM	Fisher	p
Condición almacenamiento	0,0004	1	0,0004	0,09	0,7742
Tiempo almacenamiento	0,0323	7	0,0046	1,03	0,4872
Error	0,0315	7	0,0045		
Total (corregido)	0,0642	15			
Contenido de Sodio					
Fuente	SC	GL	CM	Fisher	p
Condición almacenamiento	0,0371	1	0,0371	0,84	0,3894
Tiempo almacenamiento	0,2520	7	0,0360	0,82	0,6011
Error	0,3081	7	0,0440		
Total (corregido)	0,5972	15			
Contenido de Calcio					
Fuente	SC	GL	CM	Fisher	p
Condición almacenamiento	0,000006	1	0,000006	0,00	0,9973
Tiempo almacenamiento	5,7599	7	0,8228	1,62	0,2711
Error	3,5655	7	0,5094		
Total (corregido)	9,325406	15			
Contenido de Magnesio					
Fuente	SC	GL	CM	Fisher	p
Condición almacenamiento	1,5688	1	1,5688	2,97	0,1283
Tiempo almacenamiento	3,8595	7	0,5514	1,04	0,4776
Error	3,6936	7	0,5276		
Total (corregido)	9,1219	15			
<i>SC: Suma de cuadrados, GL: Grados de libertad, CM: Cuadrado medio, p: Valor de probabilidad</i>					

Anexo 14. Resultados del análisis de varianza para los diferentes pretratamientos de la cachaza y el estiércol de ganado vacuno

Tabla 1. Tabla ANOVA para el porcentaje de extracción de MO en el AH para las dos materias primas

% EMO _{AH} a partir de la cachaza					
Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	Fisher	p
Entre grupos	80,1775	3	26,7258	1247,41	0,0000
Dentro del grupo	0,1714	8	0,0214		
Total (corregido)	80,3489	11			
% EMO _{AH} a partir del EGV					
Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	Fisher	p
Entre grupos	104,819	3	34,9397	2268,81	0,0000
Dentro del grupo	0,1232	8	0,0154		
Total (corregido)	104,942	11			

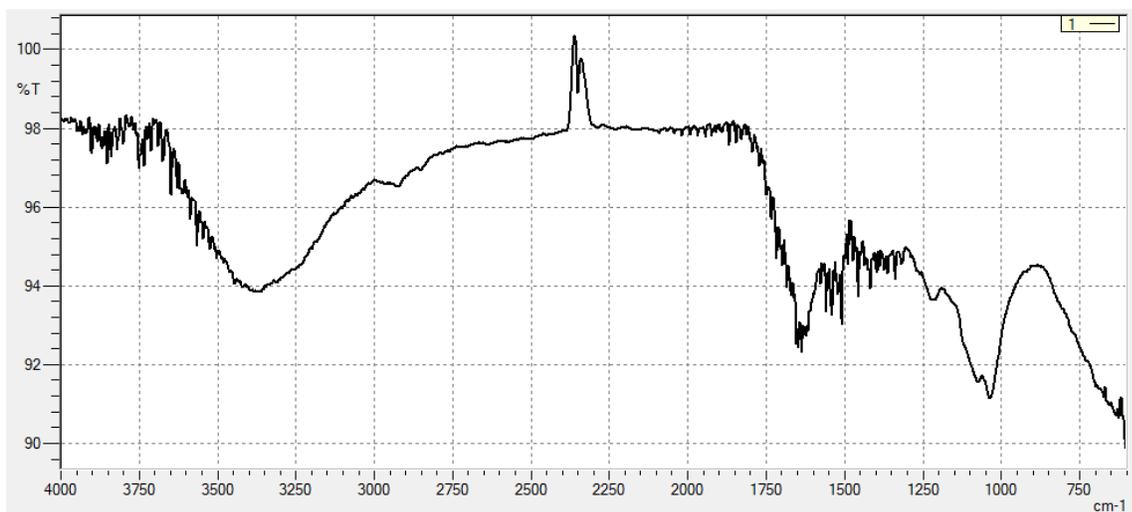
GL: Grados de libertad, p: Valor de probabilidad

Tabla 2. Prueba de múltiple rango de Duncan

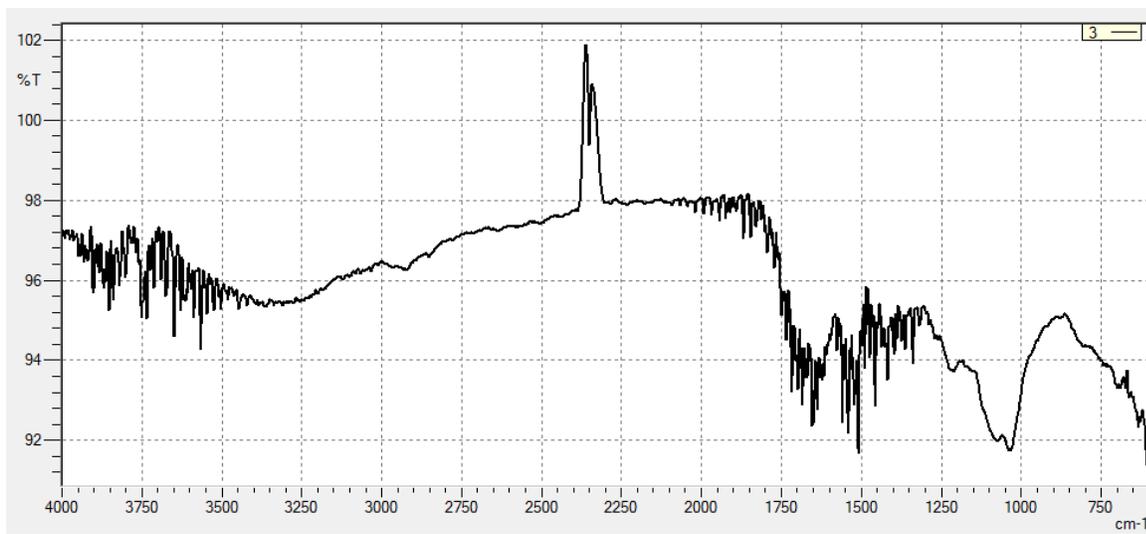
Pretratamiento	Grupos homogéneos para la cachaza				Grupos homogéneos para el estiércol de ganado vacuno			
T	a				A			
TT 2 mm		a				B		
TT 4 mm			b				C	
ST				c				D

ANEXO 15. Resultados del método de espectrofotometría infrarroja para el ácido húmico obtenido a partir de cachaza y estiércol de ganado vacuno

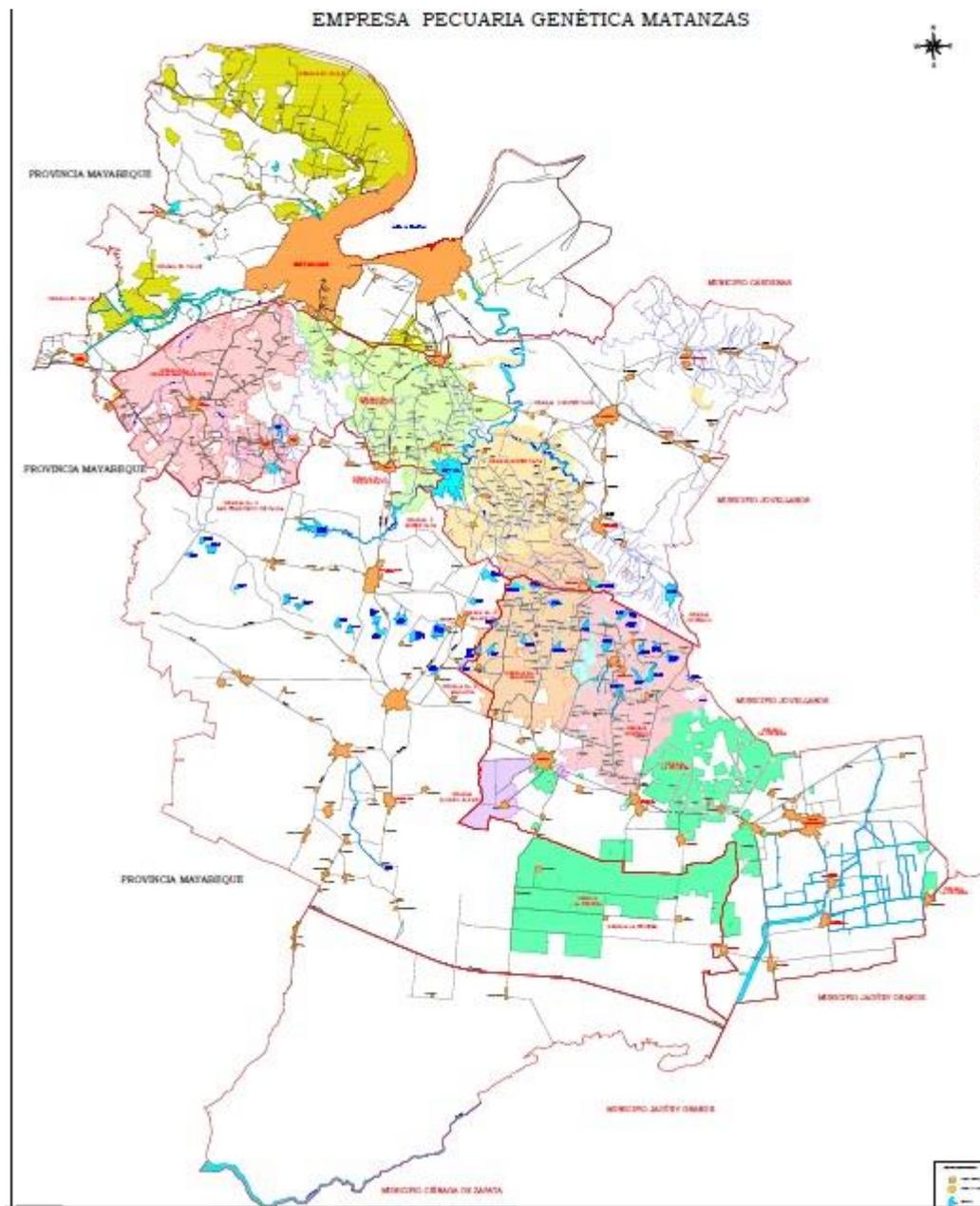
- Ácido húmico a partir de la cachaza



- Ácido húmico a partir del estiércol de ganado vacuno



Anexo 16. Mapa de las UEB de la Empresa Pecuaria Genética



Anexo 17. Datos de producción de la Empresa Pecuaria Genética Provincial

Tabla 1. Unidades de la Empresa Pecuaria Genética

Unidad	Existencia de unidades / condiciones de infraestructura				No existen
	Total	Buena	Regular	Mala	
Vaquerías Típicas (120)	181	50	84	47	1
Vaquerías Típicas (288)	4	4	0	0	0
Vaquerías rústicas	10	0	10	0	0
Recrías típicas	16	10	3	3	0
Centros de Destete Típicos	23	13	5	5	2
Desarrollo hembras típicos	15	10	2	2	3
Centro de Novillas	16	6	5	3	2
Totales	265	93	105	60	8

Tabla 2. Cantidad de ganado según su clasificación por UEB

Clasificación	Empresa Pecuaria Genética						
	2	4	5	6	7	8	Total
Terneros	994	1180	1000	1032	1430	978	6614
Añojos	480	555	382	405	630	553	3005
Novillos	1174	1367	1313	1270	1329	1004	7457
Vacas	1505	1678	1914	1512	1930	926	9465
Toros	16	155	106	28	188	68	611
Sementales	0	0	0	0	0	6	6
Celadores	46	69	58	26	68	33	300
Bueyes	80	70	71	52	132	47	454
Total	4295	5074	4844	4375	5707	3615	27910

Anexo 17. Continuación

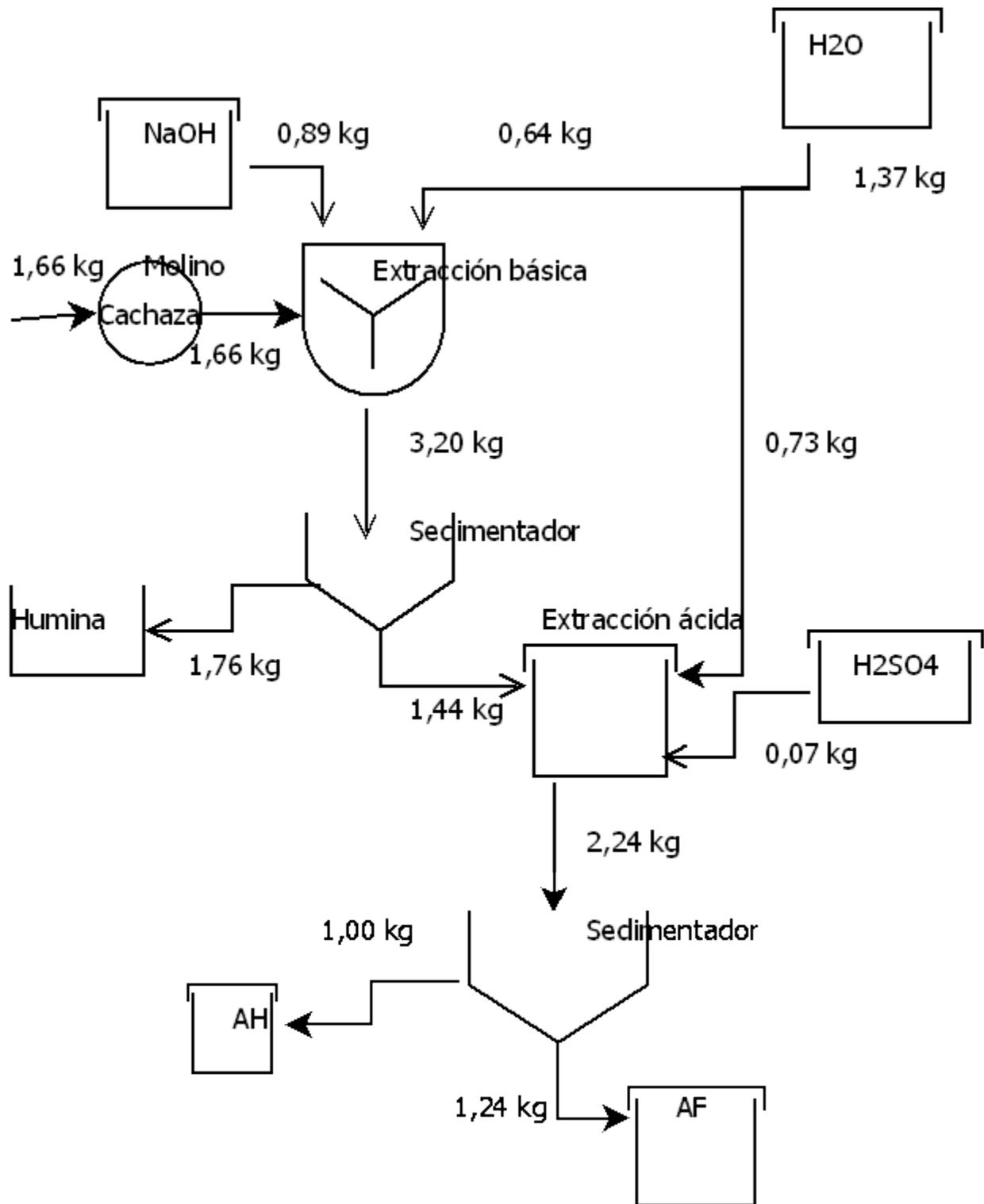
Tabla 3. Cantidad de UGM por clasificación de ganado vacuno,

Clasificación	Cantidad (U)	Proporción (UGM/U)	Cantidad (UGM)
Terneros	6614	0,25	1654
Añojos	3005	0,50	1503
Novillos	7457	0,75	5593
Vacas	9465	1,00	9465
Toros	611	1,00	611
Sementales	6	1,10	7
Celadores	300	1,10	330
Bueyes	454	1,10	500
Total de UGM			19663

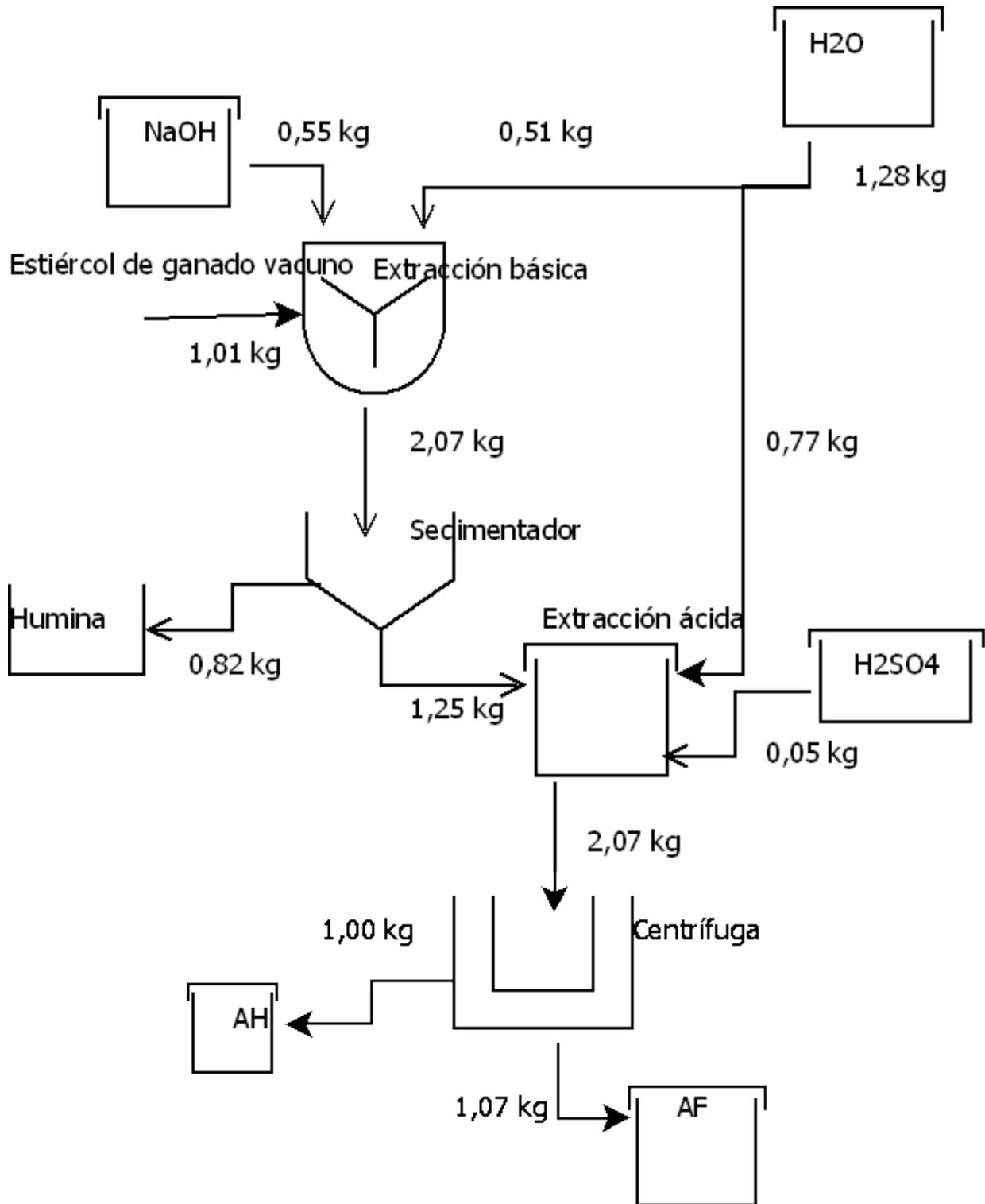
Anexo 19. Equipos que conformarán el proceso de obtención del ácido húmico, para cada alternativa tecnológica

Etapa	Alternativa A	Alternativa B
Pretratamiento de la materia prima	Molino: para triturar	-
Almacenar materiales auxiliares (hidróxido de sodio, el ácido sulfúrico y agua), producto (ácido húmico) y subproductos (ácido fúlvico y humina)	Tanques de almacenamiento de materiales auxiliares, producto y subproductos	Tanques de almacenamiento de materiales auxiliares, producto y subproductos
Extracción básica	Tanque de agitación y mezclado	Tanque de agitación y mezclado
Separación de las sustancias húmicas	Sedimentador	Sedimentador
Extracción ácida	Tanque con la disolución de ácido sulfúrico y las sustancias húmicas.	Tanque con la disolución de ácido sulfúrico y las sustancias húmicas.
Fraccionamiento de las sustancias húmicas	Sedimentador	Centrífuga

ANEXO 20. Diagrama de flujo para producir 1 kg de ácido húmico a partir de la cachaza



ANEXO 21. Diagrama de flujo para producir 1 kg de ácido húmico, a partir del estiércol de ganado vacuno



Anexo 22. Metodología para el diseño de las características del agitador

Para calcular la potencia del agitador (N) según se emplea la siguiente ecuación:

$$N = K_n * \rho_s * n^3 * d^5$$

Donde:

K_n : número de potencia

ρ_s : densidad de la suspensión (kg/m³)

n : velocidad de rotación del rodete (rev/s)

d : diámetro del agitador (m)

Para obtener el número de potencia (K_n) es necesario conocer el criterio del Reynold de mezclado Re_m y el tipo de agitador.

$$Re_m = \frac{n*d^2*\rho_s}{\mu_s}$$

Donde:

μ_s : viscosidad de la suspensión

ρ_s : densidad de la suspensión

El valor de la viscosidad de la suspensión se halla por medio de las siguientes expresiones 2 y 3 para $\emptyset \leq 0,1$ y $\emptyset \leq 0,3$ respectivamente

$$\mu_s = \mu * (1 + 2,5 * \emptyset)$$

$$\mu_s = \mu * \frac{0,59}{(0,77-\emptyset)^2}$$

La fracción volumen de sólido (\emptyset) en la suspensión se determina por la siguiente ecuación

$$\emptyset = \frac{x*\rho}{\rho_p - (\rho_p - \rho)x}$$

Donde:

x : fracción de masa de sólido en una suspensión

ρ_p : densidad de la partícula (kg/m³)

ρ : densidad del líquido o medio continuo (kg/m³)

La densidad de la suspensión se determina por medio de la siguiente ecuación

$$\frac{1}{\rho_s} = \frac{x}{\rho_p} + \frac{1-x}{\rho}$$

La fracción másica de sólido en la suspensión (x) se determina a partir del flujo productivo y la humedad, por la siguiente ecuación

$$x = \frac{m(NaO)_{sólido} + m(MP)_{seca}}{m(MP)_{total}}$$

Anexo 23. Metodología para el diseño de un sedimentador.

1. Una vez que se extraen las SH durante la etapa básica, bajo las condiciones establecidas, se vierte la mezcla en una probeta graduada y se deja reposar.
2. A intervalos periódicos se observa la altura de la superficie que separa el líquido claro que sobrenada, de la capa que contiene el sólido en suspensión.
3. Las alturas (Z) observadas se representan gráficamente en función del tiempo (t), y para diferentes valores de tiempo se trazan tangentes a la curva y se determina la velocidad de sedimentación mediante la ecuación 1:

$$v = \frac{dz}{dt} = \frac{(Z_i - Z)}{t} \quad (\text{ec. 1})$$

4. La concentración de la capa que se forma en el fondo del sedimentador se determina mediante la ecuación siguiente:

$$C' = \frac{C_0 Z_0}{Z_i} \quad (\text{ec. 2})$$

5. En el rango $C'_f \leq C' \leq C'_0$ se determina el gasto másico de sólidos por unidad de área (QC'/A), mediante la ecuación 3. A partir de los resultados obtenidos se construye un gráfico QC'/A en función de la velocidad de sedimentación,

$$\frac{QC'}{A} = \frac{v}{\left(\frac{1}{C'} - \frac{1}{C_f}\right) \frac{\rho_s}{\rho}} \quad (\text{ec. 3})$$

La densidad promedio de la suspensión se determina mediante la ecuación siguiente:

$$\rho_s = \frac{(\rho_s + \rho_{sf})}{2} \quad (\text{ec. 4})$$

Donde la densidad de la suspensión en cada punto se calcula mediante la ecuación 5.

$$\rho_s = \rho \left[1 + C' \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_p} \right) \right] \quad (\text{ec. 5})$$

6. El área mínima que requiere el sedimentador se determina mediante la ecuación 6:

$$A_{\min} = \frac{Q_0 C'_0}{(QC'/A)_{\min}} \quad (\text{ec. 6})$$

7. La altura total del sedimentador se determina mediante la ecuación 7, la cual incluye la altura de inmersión del tubo de alimentación, la altura del cono de fondo y altura de capacidad de

almacenaje para hacer frente a interrupciones e irregularidades de la descarga. Para todos los casos el intervalo se encuentra entre 0,30 y 0,60 m

$$h = h_{alimentación} + h_{cono} + h_{almacenaje} \quad (\text{ec. 7})$$

Anexo 23. Continuación.

8. Para la etapa de fraccionamiento de SH es necesario determinar, además, la altura de la zona de espesamiento, la cual se calcula mediante la ec. 8.

$$h_D = \frac{V_D}{A} \quad (\text{ec. 8})$$

Donde el volumen de dicha zona se halla a partir de la ecuación 9,

$$V_D = Q_0 C'_0 (t_f - t_c) \left(\frac{1}{\rho_P} + \frac{1}{\rho \cdot X} \right) \quad (\text{ec. 9})$$

La fracción másica en el punto crítico y en el fondo se determina mediante la ecuación 10,

$$x = \frac{C'}{\rho_s} \quad (\text{ec. 10})$$

Mediante la ecuación 11 se determina la relación másica en el punto crítico y el fondo y a partir de dichos resultados se halla la relación másica promedio que se utiliza en la ecuación 2,23,

$$X = \frac{x}{1-x} \quad (\text{ec. 11})$$

Para determinar la densidad de la partícula, se pesan, en picnómetros de 50 mL previamente tarados, 5, 10 y 20 g de materia prima seca. Luego, se completa el volumen de los mismos con agua destilada y se pesan nuevamente. La densidad de la suspensión se determina por la ecuación 12.

$$\rho_s = \frac{(m_{\text{picnómetro+suspensión}} - m_{\text{picnómetro}})}{V_{\text{picnómetro}}} \quad (\text{ec. 12})$$

A partir de estos resultados se construye la curva $(\rho_s)^{-1}$ vs x, que representa la ecuación 13, mediante la cual se determina la densidad de la partícula,

$$\frac{1}{\rho_s} = \left(\frac{1}{\rho_P} - \frac{1}{\rho} \right) x + \frac{1}{\rho} \quad (\text{ec. 13})$$

Anexo 24. Metodología para el diseño de una centrífuga

Para seleccionar la centrífuga se utiliza el criterio del área equivalente, según la ecuación 1

$$\left(\frac{Q}{\Sigma}\right)_1 = \left(\frac{Q}{\Sigma}\right)_2 \quad (\text{ec. 1})$$

El área equivalente para una centrífuga de botella se determina mediante la ecuación 2

$$\Sigma = \frac{w^2 V}{2 \cdot g \cdot \ln\left(\frac{2r_3^2}{r_3^2 - r_1^2}\right)} \quad (\text{ec. 2})$$

Donde

r_3 : representa el radio final de la interfase entre el líquido y los sólidos sedimentados

r_1 : representa el radio de la superficie del líquido.

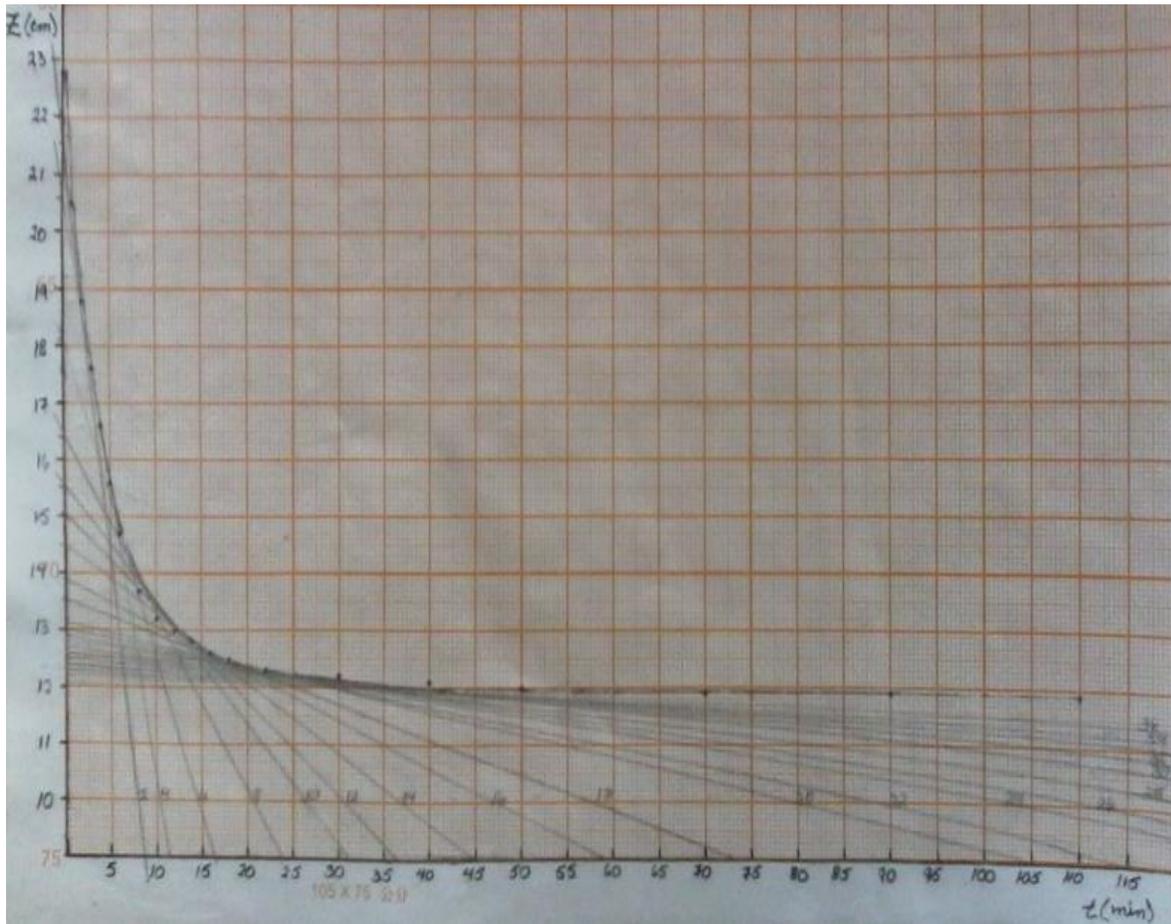
w : velocidad angular, rad/s

V : volumen, m^3

g : constante de gravedad, $9,8 \text{ m}^2/\text{s}$

Posteriormente se selecciona en el catálogo la que cumpla con las especificaciones del proceso.

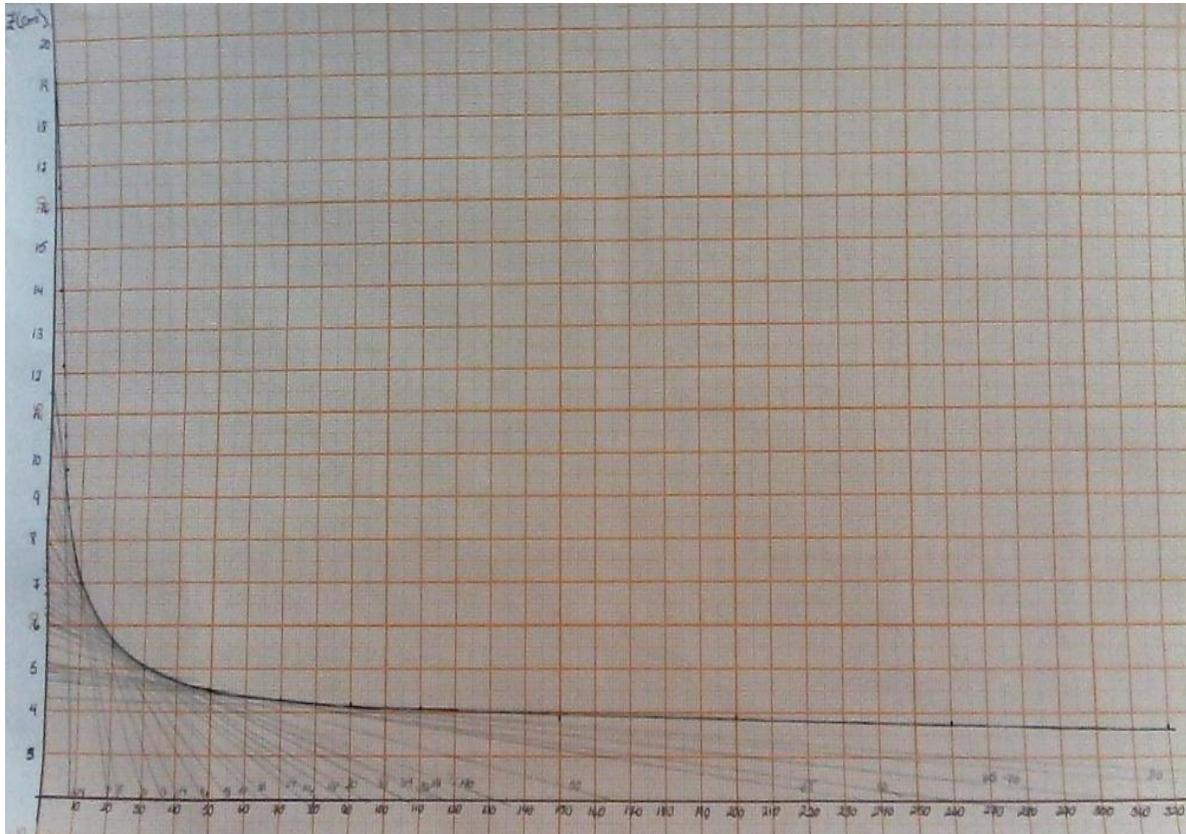
Anexo 25. Determinación gráfica de la velocidad de sedimentación para la etapa de separación de SH a partir de cachaza como materia prima (alternativa A)



Anexo 26. Resultados de la metodología de diseño del sedimentador para la etapa de separación de SH obtenidas a partir de cachaza (alternativa A)

t (min)	Z (cm)	Zi (cm)	t (h)	Z (m)	Zi (m)	v (m/h)	C'(kg/m ³)	1/C'-1/C'f (m ³ /kg)	ρs (kg/m ³)	ρsmedia (kg/m ³)	ρs/ρ	QC'/A (kg/h m ²)
2	18,9	21,6	0,033	0,189	0,216	0,810	64,815	0,006785714	1054,287	1079,731	1,085	110,00
4	16,6	20,5	0,067	0,166	0,205	0,585	68,293	0,006	1057,765	1081,470	1,087	89,70
6	14,9	17,9	0,1	0,149	0,179	0,300	78,212	0,004142857	1067,685	1086,430	1,092	66,32
8	14	16,6	0,133	0,140	0,166	0,195	84,337	0,003214286	1067,685	1086,430	1,092	55,56
10	13,5	15,5	0,167	0,135	0,155	0,120	90,323	0,002428571	1079,795	1092,485	1,098	45,00
12	13,1	15	0,2	0,131	0,150	0,095	93,333	0,002071429	1082,806	1093,990	1,099	41,71
14	12,8	14,3	0,233	0,128	0,143	0,064	97,902	0,001571429	1087,374	1096,275	1,102	37,13
16	12,6	13,9	0,267	0,126	0,139	0,049	100,719	0,001285714	1090,192	1097,683	1,103	34,37
18	12,5	13,2	0,3	0,125	0,132	0,023	106,061	0,000785714	1095,533	1100,354	1,106	26,85
20	12,4	13	0,333	0,124	0,130	0,018	107,692	0,000642857	1097,165	1101,170	1,107	25,30
22	12,3	12,9	0,367	0,123	0,129	0,016	108,527	0,000571429	1097,999	1101,587	1,107	25,87
24	12,25	12,8	0,4	0,123	0,128	0,014	109,375	0,0005	1098,847	1102,011	1,108	24,83
26	12,2	12,7	0,433	0,122	0,127	0,012	110,236	0,000428571	1099,708	1102,442	1,108	24,30
28	12,15	12,6	0,467	0,122	0,126	0,010	111,111	0,000357143	1100,583	1102,879	1,108	24,36
30	12,1	12,5	0,5	0,121	0,125	0,008	112,000	0,000285714	1101,472	1103,323	1,109	25,25
32	12,07	12,4	0,533	0,121	0,124	0,006	112,903	0,000214286	1102,375	1103,775	1,109	26,03
34	12,05	12,3	0,567	0,121	0,123	0,004	113,821	0,000142857	1103,293	1104,234	1,110	27,83
36	12,02	12,2	0,6	0,120	0,122	0,003	114,754	7,14286E-05	1104,226	1104,701	1,110	37,83

Anexo 27. Determinación de la velocidad de sedimentación mediante el gráfico Z (cm) vs t (min), para la etapa de fraccionamiento de SH a partir de cachaza como materia prima, en la alternativa A



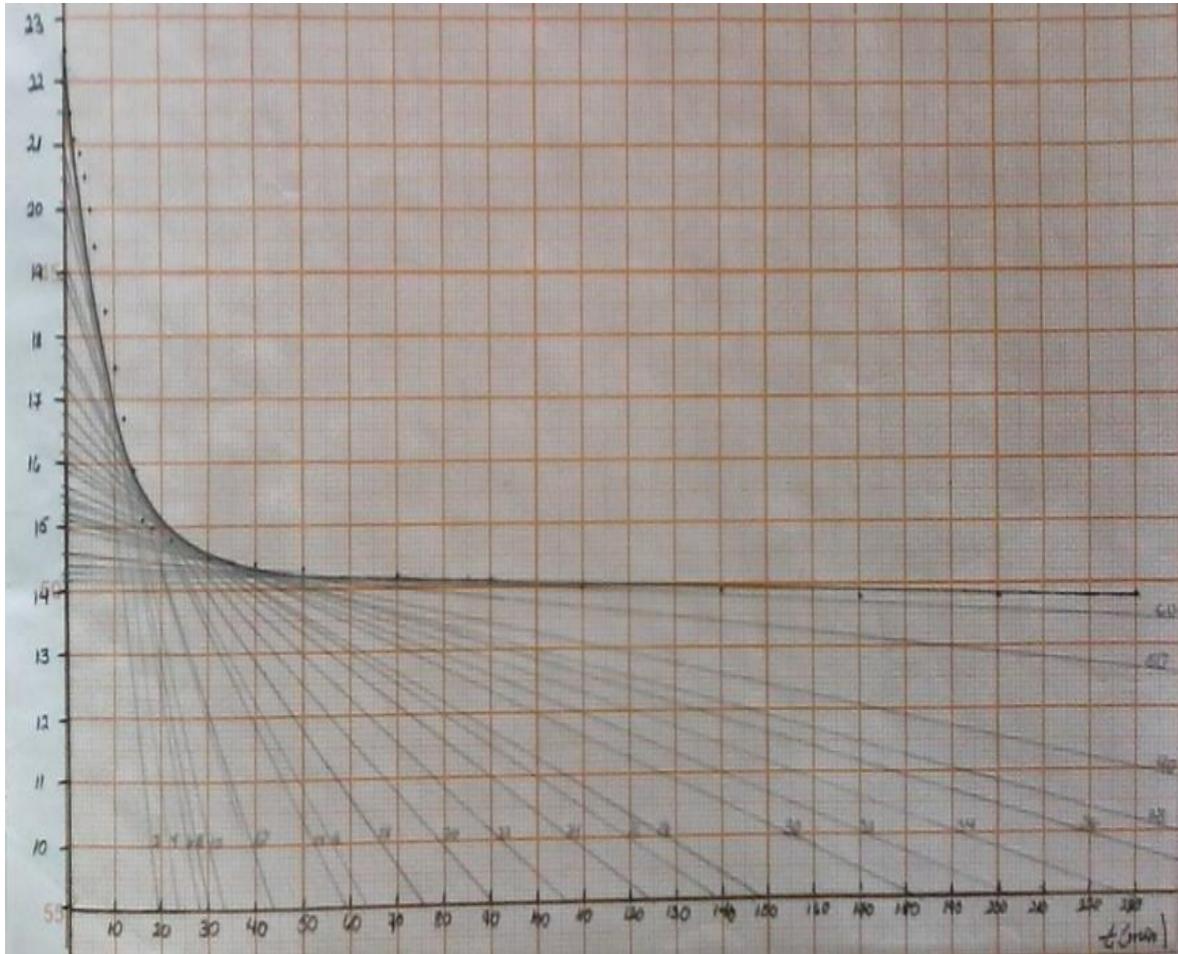
Anexo 28. Resultados de la metodología de diseño del sedimentador para la etapa de fraccionamiento de SH, para la alternativa A

t (min)	Z (cm)	Zi(cm)	t (h)	Z (m)	Zi(m)	v (m/h)	C'(kg/m ³)	1/C'-1/C'f (m ³ /kg)	ρs (kg/m ³)	ρsmedia (kg/m ³)	ρs/ρ	QC'/A (kg/h m ²)
2	15,50	19,00	0,033	0,155	0,19	1,050	35,000	0,0223	1065,419	1090,999	1,038	45,445
4	11,00	19,00	0,067	0,11	0,19	1,200	35,000	0,0223	1065,419	1090,999	1,038	51,937
6	8,80	11,50	0,100	0,088	0,115	0,270	57,826	0,0110	1074,887	1095,734	1,043	23,590
8	7,80	10,70	0,133	0,078	0,107	0,218	62,150	0,0098	1076,681	1096,630	1,044	21,324
10	7,10	9,30	0,167	0,071	0,093	0,132	71,505	0,0077	1080,562	1098,571	1,045	16,465
12	6,70	8,80	0,200	0,067	0,088	0,105	75,568	0,0069	1082,247	1099,414	1,046	14,510
14	6,30	8,50	0,233	0,063	0,085	0,094	78,235	0,0065	1083,354	1099,967	1,047	13,931
16	6,10	7,90	0,267	0,061	0,079	0,068	84,177	0,0056	1085,818	1101,199	1,048	11,578
18	5,90	7,60	0,300	0,059	0,076	0,057	87,500	0,0051	1087,197	1101,888	1,049	10,570
20	5,70	7,30	0,333	0,057	0,073	0,048	91,096	0,0047	1088,688	1102,634	1,049	9,814
22	5,50	7,10	0,367	0,055	0,071	0,044	93,662	0,0044	1089,753	1103,166	1,050	9,532
24	5,40	6,90	0,400	0,054	0,069	0,038	96,377	0,0041	1090,879	1103,730	1,050	8,794
26	5,30	6,70	0,433	0,053	0,067	0,032	99,254	0,0038	1092,073	1104,326	1,051	8,178
28	5,20	6,60	0,467	0,052	0,066	0,030	100,758	0,0036	1092,696	1104,638	1,051	7,908
30	5,00	6,30	0,500	0,05	0,063	0,026	105,556	0,0032	1094,687	1105,633	1,052	7,826
32	4,95	6,20	0,533	0,0495	0,062	0,023	107,258	0,0030	1095,393	1105,986	1,052	7,405
34	4,90	6,10	0,567	0,049	0,061	0,021	109,016	0,0029	1096,122	1106,351	1,053	7,040
36	4,80	6,00	0,600	0,048	0,06	0,020	110,833	0,0027	1096,876	1106,728	1,053	7,016
38	4,75	5,90	0,633	0,0475	0,059	0,018	112,712	0,0026	1097,655	1107,118	1,053	6,742
40	4,70	5,80	0,667	0,047	0,058	0,017	114,655	0,0024	1098,461	1107,521	1,054	6,507
50	4,50	5,50	0,833	0,045	0,055	0,012	120,909	0,0020	1101,056	1108,818	1,055	5,818
55	4,40	5,10	0,917	0,044	0,051	0,008	130,392	0,0014	1104,989	1110,785	1,057	5,338
60	4,35	5,00	1,000	0,0435	0,05	0,007	133,000	0,0012	1106,071	1111,326	1,057	5,109

Anexo 28. Continuación

t (min)	Z (cm)	Zi(cm)	t (h)	Z (m)	Zi(m)	v (m/h)	C'(kg/m ³)	1/C'- 1/C'f (m ³ /kg)	ρs (kg/m ³)	ρsmedia (kg/m ³)	ρs/ρ	QC'/A (kg/h m ²)
65	4,30	4,90	1,083	0,043	0,049	0,006	135,714	0,0011	1107,197	1111,889	1,058	4,973
70	4,30	4,90	1,167	0,043	0,049	0,005	135,714	0,0011	1107,197	1111,889	1,058	4,618
80	4,30	4,90	1,333	0,043	0,049	0,005	135,714	0,0011	1107,197	1111,889	1,058	4,041
90	4,20	4,70	1,500	0,042	0,047	0,003	141,489	0,0008	1109,593	1113,086	1,059	4,186
100	4,10	4,50	1,667	0,041	0,045	0,002	147,778	0,0005	1112,201	1114,391	1,060	5,017
110	4,10	4,40	1,833	0,041	0,044	0,002	151,136	0,0003	1113,595	1115,087	1,061	5,128
130	4,00	4,34	2,167	0,04	0,0434	0,002	153,226	0,0002	1114,461	1115,521	1,061	7,022
150	4,00	4,30	2,500	0,04	0,043	0,001	154,651	0,0002	1115,053	1115,816	1,062	7,516

Anexo 29. Determinación de la velocidad de sedimentación mediante el gráfico Z (cm) vs t (min), para la etapa de separación de SH a partir de estiércol como materia prima, para la alternativa B



Anexo 30. Resultados de la metodología de diseño del sedimentador para la etapa de separación de SH obtenidas a partir de estiércol, para la alternativa B.

t (min)	Z (cm)	Zi(cm)	t (h)	Z (m)	Zi(m)	v (m/h)	C'(kg/m ³)	1/C'-1/C'f (m ³ /kg)	ρs (kg/m ³)	ρsmedia (kg/m ³)	ρs/ρ	QC'/A (kg/h m ²)
2	20,7	22	0,033	0,207	0,220	0,390	69,436	0,00510605	1030,392	1038,343	1,037	73,665
4	19,4	21,5	0,067	0,194	0,215	0,315	71,051	0,00477874	1031,065	1038,680	1,037	63,554
6	18,5	20,8	0,100	0,185	0,208	0,230	73,442	0,0043205	1032,062	1039,178	1,038	51,301
8	17,7	20,5	0,133	0,177	0,205	0,210	74,517	0,00412412	1032,510	1039,403	1,038	49,060
10	16,8	19,5	0,167	0,168	0,195	0,162	78,338	0,00346949	1034,104	1040,199	1,039	44,953
12	16,2	19	0,200	0,162	0,190	0,140	80,400	0,00314218	1034,963	1040,629	1,039	42,877
14	15,8	17,9	0,233	0,158	0,179	0,090	85,341	0,0024221	1037,023	1041,659	1,040	35,723
16	15,5	17,7	0,267	0,155	0,177	0,083	86,305	0,00229118	1037,425	1041,860	1,040	34,611
18	15,3	17,2	0,300	0,153	0,172	0,063	88,814	0,00196386	1038,471	1042,383	1,041	30,983
20	15,1	16,8	0,333	0,151	0,168	0,051	90,929	0,00170202	1039,353	1042,824	1,041	28,775
22	14,95	16,5	0,367	0,150	0,165	0,042	92,582	0,00150563	1040,042	1043,169	1,042	26,953
24	14,8	16,2	0,400	0,148	0,162	0,035	94,296	0,00130924	1040,757	1043,526	1,042	25,655
26	14,7	16	0,433	0,147	0,160	0,030	95,475	0,00117832	1041,249	1043,772	1,042	24,427
28	14,6	15,9	0,467	0,146	0,159	0,028	96,075	0,00111286	1041,499	1043,897	1,042	24,014
30	14,55	15,7	0,500	0,146	0,157	0,023	97,299	0,00098193	1042,009	1044,152	1,043	22,465
32	14,5	15,5	0,533	0,145	0,155	0,019	98,555	0,00085101	1042,533	1044,414	1,043	21,126
34	14,45	15,4	0,567	0,145	0,154	0,017	99,195	0,00078555	1042,800	1044,547	1,043	20,461
36	14,4	15,3	0,600	0,144	0,153	0,015	99,843	0,00072008	1043,070	1044,682	1,043	19,969
38	14,35	15,3	0,633	0,144	0,153	0,015	99,843	0,00072008	1043,070	1044,682	1,043	19,969
40	14,3	14,7	0,667	0,143	0,147	0,006	103,918	0,00032731	1044,769	1045,532	1,044	17,558
50	14,2	14,65	0,833	0,142	0,147	0,005	104,273	0,00029458	1044,917	1045,606	1,044	17,557
60	14,2	14,6	1,000	0,142	0,146	0,004	104,630	0,00026185	1045,066	1045,680	1,044	14,630
70	14,2	14,6	1,167	0,142	0,146	0,003	104,630	0,00026185	1045,066	1045,680	1,044	12,540

Anexo 30. Continuación

t (min)	Z (cm)	Zi(cm)	t (h)	Z (m)	Zi(m)	v (m/h)	C'(kg/m ³)	1/C'-1/C'f (m ³ /kg)	ρs (kg/m ³)	ρsmedia (kg/m ³)	ρs/ρ	QC'/A (kg/h m ²)
90	14,1	14,5	1,500	0,141	0,145	0,003	105,352	0,00019639	1045,367	1045,831	1,044	13,002
110	14,02	14,3	1,833	0,140	0,143	0,002	106,825	6,5462E-05	1045,981	1046,138	1,045	22,334
130	14,02	14,27	2,167	0,140	0,143	0,001	107,050	4,5824E-05	1046,075	1046,185	1,045	24,103
150	13,99	14,24	2,500	0,140	0,142	0,001	107,275	2,6185E-05	1046,169	1046,232	1,045	36,555

Anexo 31. Especificaciones y características de desempeño de centrifugas típicas de sedimentación.

Tipo	Diámetro	Velocidad, rpm	Fuerza centrífuga máxima / gravedad	Rendimiento	
				Líquido, gal/min	Sólido, t/h
Tubular	1,75	50 000*	62 400	0,02 – 0,25	
	4,125	15 000	13 200	0,1 – 10	
	5	15 000	15 900	0,2 – 20	
Disco	7	12 000	14 300	0,1 – 10	
	13	7 500	10 400	5 – 50	
	24	4 000	5 500	20 – 200	
Boquilla	10	10 000	14 200	10 – 40	0,1 – 1
	16	6 250	8 900	25 – 150	0,4 – 4
	27	4 200	6 750	40 – 400	1 – 11
	30	3 300	4 600	40 – 400	1 – 11
Desplazamiento	6	8 000	5 500	≥ 20	0,03 – 0,25
	14	4 000	3 180	≥ 75	0,5 – 1,5
	18	3 500	3 130	≥ 100	1 – 3
	24	3 000	3 070	≥ 250	2,5 – 12
	30	2 700	3 105	≥ 350	3 – 15
	36	2 250	2 590	≥ 600	10 – 25
	44	1 600	1 600	≥ 700	10 – 25
	54	1 000	770	≥ 750	20 – 60
Cuchillo	20	1 800	920	1	1,01 ↓
	36	1 200	740	1	4,1 ↓
	64	900	780	1	20,5 ↓

Fuente: Tabla 19-12, Perry y Green (2008)

Anexo 32. Factores de escalamiento para centrífugas de sedimentación

Tipo	Diámetro interior, pulg	Diámetro disco, pulg / número de discos	Velocidad, rpm	Σ valor, unidad de 10^4 pie^2
Tubular	1,75		23 000	0,32
	4,125		15 000	2,7
	4,90		15 000	4,2
Disco		4,1 / 33	10 000	1,1
		9,05 / 177	6 500	21,5
		12,4 / 98	6 250	42,5
		13,7 / 132	4 650	39,3
		19,5 / 144	4 240	105
Desplazamiento	6		6 000	0,27
	14		4 000	1,34
	14 \updownarrow		4 000	3,0
	18		3 450	3,7
	20		3 350	4,0
	25		3 000	6,1
	25		2 750	8,6

Fuente: Tabla 19-13, Perry y Green (2008)

Anexo 33. Resultados de capacidades de los equipos para determinar el cuello de botella

Tabla 33.1 Tanques de almacenamiento

Tanque de almacenamiento	Alternativa A		Alternativa B	
	Producción actual	Producción aumentada	Producción actual	Producción aumentada
	Volumen (m ³)			
Hidróxido de sodio	2,74	2,97	0,92	0,97
Humina	29,04	30,26	14,55	14,99
Agua	95,29	99,77	0,07	0,08
Ácido sulfúrico	2,40	2,41	0,81	0,86
Ácido fúlvico	113,45	117,55	21,61	22,70
Ácido húmico	73,51	79,32	73,51	79,32
Extracción ácida	27,83	30,14	0,89	0,94

Tanque 33.2. Otros equipos

Parámetros de diseño	Alternativa A		Alternativa B	
	Producción actual	Producción aumentada	Producción actual	Producción aumentada
Tanque de agitación para la extracción básica (Capacidad, m ³)	2,926	3,125	0,914	0,978
Sedimentador para la extracción básica (Área, m ²)	4,77	5,51	4,17	4,05
Equipo para la extracción ácida	Sedimentador (Área, m ²) 4,17	Sedimentador (Área, m ²) 5,32	Centrífuga Volumen (m ³) 0,80	Centrífuga Volumen (m ³) 0,968

Anexo 34. Metodología para la valoración económica de las alternativas

El costo de operación (COM) puede ser estimado cuando los costos siguientes son conocidos o han sido estimados:

1. Capital Fijo Invertido (FCI)
2. Costo de Mano de Obra (COL)
3. Costo de Utilidades (CUT)
4. Costo de Materia Prima (CRM)

El costo de adquisición (C_{ADQ}) ha sido estimado utilizando el *software* CAPCOST. El costo de operación se determina como:

$$COM = DMC + FMC + GE$$

Donde,

DMC: costos directos de operación

FMC: costos fijos de operación

GE: gastos generales de operación

Factores para estimar el costo de operación

1 – Costos directos de operación (DMC)		
	Descripción	Costo
A	Materia prima	C_{RM}
B	Utilidades	C_{UT}
C	Mano de obra	C_{OL}
D	Supervisión	$0,18 C_{OL}$
E	Mantenimiento	$0,06 FCI$
F	Suplementos operacionales	$0,009 FCI$
G	Laboratorio	$0,15 C_{OL}$
H	Patentes y marcas	$0,01 COM$
2 – Costos fijos de operación (FMC)		
A	Depreciación	$0,1 FCI$
B	Impuestos y seguros	$0,032 FCI$
C	Sobrecargos	$0,708 C_{OL} + 0,036 FCI$
3 – Gastos generales de operación (GE)		
A	Administración	$0,177 C_{OL} + 0,009 FCI$
B	Distribución y ventas	$0,11 COM$
C	Investigación y desarrollo	$0,05 COM$

$$C_{TM} = 1,18C_{ADQ}$$

$$C_{GR} = C_{TM} + 0,35C_{ADQ}$$

Anexo 34. Continuación

$$WC = 0,15C_{GR}$$
$$FCI = C_{GR} + WC$$

El costo de mano de obra se determina:

$$C_{OL} = (Sal)OL$$

Donde,

Sal: salario anual, CUP/año

OL: número de operadores necesarios

$$OL = 4,5N_{OP}$$

Donde,

N_{OP}: número de operadores por equipos

Anexo 35. Costo de adquisición de los equipos de cada alternativa

Equipo		Alternativa A	Alternativa B
Molino		1167500	-
Tanque de almacenamiento	Hidróxido de sodio	790000	462500
	Agua	5000000	300000
	Humina	2225000	1462000
	Ácido sulfúrico	1425000	852500
	Ácido húmico	8575000	8575000
	Ácido fúlvico	11750000	3850000
Tanque de extracción ácida		5325000	895000
Equipos de separación	Separación de las sustancias húmicas	837500	825000
	Fraccionamiento de las sustancias húmicas	4725000	2252000
Costo total para el año 2020		41820000	19474000
Costo total actualizado para el año 2021		49662127	23125783

Anexo 36. Operador requerido para varios equipos de procesos

Tipo de equipo	Operadores por turno por equipamiento
- Instalaciones auxiliares	
Plantas de aire	1,0
Calderas	1,0
Chimeneas y pilas	0,0
Torres de enfriamiento	1,0
Desmineralizadores de agua	0,5
Plantas de generación eléctrica	3,0
Plantas de generación eléctrica portable	0,5
Subestaciones eléctricas	0,0
Incineradores	2,0
Unidades frigoríficas mecanizadas	0,5
Plantas de tratamiento de aguas residuales	2,0
Plantas de tratamiento de aguas	2,0
- Equipos de procesos	
Evaporadores	0,3
Vaporizadores	0,05
Hornos	0,5
Ventiladores*	0,05
Sopladores y compresores*	0,15
Intercambiadores de calor	0,1
Torres	0,35
Tanques	0,0
Bombas*	0,0
Reactores	0,5

Anexo 37. Flujo de caja para las alternativas A y B

Tabla 37.1. Flujo de caja para la alternativa A

Interés	0,1					
Años	0	1	2	3	4	5
Inversión	87380512,46	0	0	0	0	0
CF (S.A)	0	10963521,93	10963521,93	10963521,93	10963521,93	10963521,93
CV	0	7203009,981	7203009,981	7203009,981	7203009,981	7203009,981
Total pagos	87380512,46	16487557,95	16487557,95	16487557,95	16487557,95	16487557,95
Total cobros	0	39270000	39270000	39270000	39270000	39270000
Cobros-Pagos (MF)	-87380512,5	22782442,05	22782442,05	22782442,05	22782442,05	22782442,05
MF Acumulado	-87380512,5	-64598070,41	-41815628,35	-19033186,3	3749255,75	26531697,8
MF Actualizado	-87380512,5	20711310,96	18828464,51	17116785,91	15560714,47	14146104,06
Años	6	7	8	9	10	
Inversión	0	0	0	0	0	
CF (S.A)	10963521,93	10963521,93	10963521,93	10963521,93	10963521,93	
CV	7203009,981	7203009,981	7203009,981	7203009,981	7203009,981	
Total pagos	16487557,95	16487557,95	16487557,95	16487557,95	16487557,95	
Total cobros	39270000	39270000	39270000	39270000	39270000	
Cobros-Pagos (MF)	22782442,05	22782442,05	22782442,05	22782442,05	22782442,05	
MF Acumulado	49314139,86	72096581,91	94879023,96	117661466	140443908,1	
MF Actualizado	12860094,6	11690995,09	10628177,36	9661979,415	8783617,65	

Anexo 37. Continuación

Tabla 37.2. Flujo de caja para la alternativa B

Interés	0,1					
Años	0	1	2	3	4	5
Inversión	40689815,19	0	0	0	0	0
CF (S.A)	0	5357840,026	5357840,026	5357840	5357840	5357840
CV	0	4017213,854	4017213,854	4017214	4017214	4017214
Total pagos	40689815,19	8591013,831	8591013,831	8591014	8591014	8591014
Total cobros	0	23100000	23100000	23100000	23100000	23100000
Cobros-Pagos (MF)	-40689815,2	12767907,83	12767907,83	12767908	12767908	12767908
MF Acumulado	-40689815,2	-27921907,36	-15153999,53	-2386092	10381816	23149724
MF Actualizado	-40689815,2	11607188,94	10551989,94	9592718	8720653	7927866
Años	6	7	8	9	10	
Inversión	6	7	8	9	10	
CF (S.A)	0	0	0	0	0	
CV	5357840	5357840	5357840	5357840	5357840	
Total pagos	4017214	4017214	4017214	4017214	4017214	
Total cobros	8591014	8591014	8591014	8591014	8591014	
Cobros-Pagos (MF)	23100000	23100000	23100000	23100000	23100000	
MF Acumulado	12767908	12767908	12767908	12767908	12767908	
MF Actualizado	35917632	48685540	61453447	74221355	86989263	

Anexo 38. Diseño de los equipos para las diferentes variantes de la alternativa caso base A

Tabla 38.1. Especificaciones de los tanques de almacenamiento

Tanque de almacenamiento	Alternativa A1			Alternativa A2			Alternativa 3		
	V (m ³)	D (m)	H (m)	V (m ³)	D (m)	H (m)	V (m ³)	D (m)	H (m)
Hidróxido de sodio	0,0150	0,19	0,57	2,74	1,05	3,15	2,74	1,05	3,15
Humina	0,0002	0,04	0,13	29,04	2,29	6,87	29,04	2,29	6,87
Agua	0,0080	0,15	0,46	95,29	3,39	10,17	95,29	3,39	10,17
Ácido sulfúrico	0,0261	0,23	0,68	2,40	1,01	3,02	1,98	1,59	4,77
Ácido fúlvico	0,0002	0,04	0,12	0,049	0,278	0,83	0,1234	0,38	1,13
Ácido húmico	0,0311	0,24	0,72	0,025	0,222	0,66	0,0622	0,30	0,90

Tabla 38.2 Especificaciones del tanque de extracción ácida

Alternativa A1			Alternativa A2			Alternativa A3		
V (m ³)	D (m)	H (m)	V (m ³)	D (m)	H (m)	V (m ³)	D (m)	H (m)
0,01	0,16	0,48	0,03	0,23	0,69	0,03	0,23	0,69

Tabla 38.3. Datos de diseño del tanque de agitación

Parámetro	Alternativa A1	Alternativa A2	Alternativa A3
Capacidad (m ³)	0,01	0,02	0,02
Diámetro (m)	0,16	0,21	0,21
L (m)	0,47	0,64	0,64
Rem	3863,05	6911,73	6911,73
ρ suspensión (kg/m ³)	758,08	758,08	758,08
ϕ	0,29	0,29	0,29
μ s (Pa*s)	0,003	0,003	0,003
diámetro agitador (m)	0,04	0,06	0,06
N (W)	0,02	0,11	0,11

Anexo 38. Continuación

Tabla 38.4 Parámetros de equipo de separación para la separación de las sustancias húmicas en la extracción básica

Parámetro	Alternativa A1	Alternativa A2	Parámetro	Alternativa A3
	Sedimentador	Sedimentador		Centrífuga tubular de 1,75 pulg de diámetro
QC' Humina (kg/h)	4,64	92,85	Q _f (m ³ /h)	0,05
QC'/A (min) gráfico (kg/h m ²)	23,26	25,30	ε	0,80
Área real (m ²)	0,26	4,77	Σ (m ²)	0,72
Diámetro (m)	0,58	2,47	Σ (m ²) (Anexo 32)	0,32
Altura (m)	1,2	1,2	Error (%)	55,5 %

Tabla 38.5. Parámetros de equipo de fraccionamiento de sustancias húmicas en la extracción ácida

Parámetro	Alternativa A1	Parámetro	Alternativa A2	Alternativa A4
	Sedimentador		Centrífuga de disco de 13 pulg	Centrífuga de disco de 13 pulg
QC' Humina (kg/h)	272,5	Q _f (m ³ /h)	4,03	3,22
QC'/A (min) gráfico (kg/h m ²)	24,30	ε	0,55	0,55
Área real (m ²)	14,58	Σ (m ²)	53 244,85	42543,03
Diámetro (m)	4,31	Σ (m ²) (Anexo 32)	39 483,79	39 483,79
Altura (m)	1,2	Error (%)	25,80 %	7,19 %

Anexo 39. Flujo de caja para las variantes de la alternativa A

Tabla 39.1 Flujo de caja para la variante A1

Interés	0,1					
Años	0	1	2	3	4	5
Inversión	18500262,75	0	0	0	0	0
CF (S.A)	0	2571568,133	2571568,133	2571568,133	2571568,133	2571568,133
CV	0	1859352,911	1859352,911	1859352,911	1859352,911	1859352,911
Total pagos	18500262,75	4074491,857	4074491,857	4074491,857	4074491,857	4074491,857
Total cobros	0	11550000	11550000	11550000	11550000	11550000
Cobros-Pagos (MF)	-18500262,8	7475508,143	7475508,143	7475508,143	7475508,143	7475508,143
MF Acumulado	-18500262,8	-11024754,61	-3549246,464	3926261,679	11401769,82	18877277,96
MF Actualizado	-18500262,8	6795916,494	6178105,903	5616459,912	5105872,647	4641702,407
Años	6	7	8	9	10	
Inversión	0	0	0	0	0	
CF (S.A)	2571568,133	2571568,133	2571568,133	2571568,133	2571568,133	
CV	1859352,911	1859352,911	1859352,911	1859352,911	1859352,911	
Total pagos	4074491,857	4074491,857	4074491,857	4074491,857	4074491,857	
Total cobros	11550000	11550000	11550000	11550000	11550000	
Cobros-Pagos (MF)	7475508,143	7475508,143	7475508,143	7475508,143	7475508,143	
MF Acumulado	26352786,11	33828294,25	41303802,39	48779310,54	56254818,68	
MF Actualizado	4219729,461	3836117,691	3487379,72	3170345,2	2882132	

Anexo 39. Continuación

Tabla 39.2 Flujo de caja para la variante A2

Interés	0,1					
Años	0	1	2	3	4	5
Inversión	40384923,75	0	0	0	0	0
CF (S.A)	0	5447713,632	5447713,632	5447713,632	5447713,632	5447713,632
CV	0	4662802,399	4662802,399	4662802,399	4662802,399	4662802,399
Total pagos	40384923,75	9329942,018	9329942,018	9329942,018	9329942,018	9329942,018
Total cobros	0	23100000	23100000	23100000	23100000	23100000
Cobros-Pagos (MF)	-40384923,8	13770057,98	13770057,98	13770057,98	13770057,98	13770057,98
MF Acumulado	-40384923,8	-26614865,77	-12844807,79	925250,1972	14695308,18	28465366,16
MF Actualizado	-40384923,8	12518234,53	11380213,21	10345648,37	9405134,883	8550122,621
Años	6	7	8	9	10	
Inversión	0	0	0	0	0	
CF (S.A)	5447713,632	5447713,632	5447713,632	5447713,632	5447713,632	
CV	4662802,399	4662802,399	4662802,399	4662802,399	4662802,399	
Total pagos	9329942,018	9329942,018	9329942,018	9329942,018	9329942,018	
Total cobros	23100000	23100000	23100000	23100000	23100000	
Cobros-Pagos (MF)	13770057,98	13770057,98	13770057,98	13770057,98	13770057,98	
MF Acumulado	42235424,14	56005482,13	69775540,11	83545598,09	97315656,07	
MF Actualizado	7772838,746	7066217,042	6423833,675	5839848,795	5308953,45	

Anexo 39. Continuación

Tabla 39.3 Flujo de caja para la variante A3

Interés	0,1					
Años	0	1	2	3	4	5
Inversión	42210405	0	0	0	0	0
CF (S.A)	0	5887840,816	5887840,816	5887840,816	5887840,816	5887840,816
CV	0	5951552,891	5951552,891	5951552,891	5951552,891	5951552,891
Total pagos	42210405	11019675,95	11019675,95	11019675,95	11019675,95	11019675,95
Total cobros	0	23100000	23100000	23100000	23100000	23100000
Cobros-Pagos (MF)	-42210405	12080324,05	12080324,05	12080324,05	12080324,05	12080324,05
MF Acumulado	-42210405	-30130080,95	-18049756,89	-5969432,839	6110891,215	18191215,27
MF Actualizado	-42210405	10982112,78	9983738,887	9076126,261	8251023,874	7500930,794
Años	6	7	8	9	10	
Inversión	0	0	0	0	0	
CF (S.A)	5887840,816	5887840,816	5887840,816	5887840,816	5887840,816	
CV	5951552,891	5951552,891	5951552,891	5951552,891	5951552,891	
Total pagos	11019675,95	11019675,95	11019675,95	11019675,95	11019675,95	
Total cobros	23100000	23100000	23100000	23100000	23100000	
Cobros-Pagos (MF)	12080324,05	12080324,05	12080324,05	12080324,05	12080324,05	
MF Acumulado	30271539,32	42351863,38	54432187,43	66512511,48	78592835,54	
MF Actualizado	6819027,995	6199116,359	5635560,326	5123236,66	4657487,873	

Anexo 40. Diseño de los equipos para las diferentes variantes de la alternativa caso base B

Tabla 40.1. Especificaciones de los tanques de almacenamiento

Tanque de almacenamiento	Alternativa B1			Alternativa B2		
	V (m ³)	D (m)	H (m)	V (m ³)	D (m)	H (m)
Hidróxido de sodio	0,30647	0,51	1,53	0,91943	0,73	2,20
Humina	4,84855	1,27	3,81	14,54568	1,82	5,47
Agua	0,02427	0,22	0,66	0,07280	0,32	0,95
Ácido sulfúrico	0,27035	0,49	1,47	0,81105	0,70	2,11
Ácido fúlvico	7,20343	1,45	4,34	21,61036	2,08	6,23
Ácido húmico	24,50252	2,17	6,50	73,50778	3,11	9,34

Tabla 40.2 Especificaciones del tanque de extracción ácida

Alternativa B1			Alternativa B2		
V (m ³)	D (m)	H (m)	V (m ³)	D (m)	H (m)
0,41	0,56	1,69	1,24	0,81	2,43

Tabla 40.3. Datos de diseño del tanque de agitación

Parámetro	Alternativa B1	Alternativa B2
Capacidad (m ³)	0,292	0,914
Diámetro (m)	0,499	0,729
L (m)	1,497	2,188
Rem	164466,694	351521,524
ρ suspensión (kg/m ³)	1024,984	1024,984
ϕ	0,043	0,043
μ s (Pa*s)	0,001	0,001
diámetro agitador (m)	0,165	0,241
N (W)	24,903	166,315

Anexo 40. Continuación

Tabla 40.4 Parámetros de equipo de separación para la separación de las sustancias húmicas en la extracción básica

Parámetro	Alternativa B1	Parámetro	Alternativa B2
	Sedimentador		Centrífuga Tubular (5 pulg)
QC' Humina (kg/h)	1,23	Q _f (m ³ /h)	0,80
QC'/A (min) gráfico (kg/h m ²)	8,56	ε	0,8
Área real (m ²)	0,19	Σ (m ²)	7266,67
Diámetro (m)	0,49	Σ (m ²) (Anexo 32)	3 901,93
Altura (m)	1,2	Error (%)	46,30

Tabla 40.5. Parámetros de equipo de fraccionamiento de sustancias húmicas en la extracción ácida

Parámetro	Alternativa B1	Alternativa B2
	Centrífuga de disco de 7 pulg	Centrífuga de disco de 13 pulg
Q _f (m ³ /h)	1,76	1,52
ε	0,55	0,8
Σ (m ²)	23253,33	15986,67
Σ (m ²) (Anexo 32)	19 974,15	13806,67
Error (%)	14,00	13,64

Anexo 41. Flujo de caja para las alternativas del caso base B

Tabla 41.1 Flujo de caja para la variante B1

Interés	0,1					
Años	0	1	2	3	4	5
Inversión	18500262,8	0	0	0	0	0
CF (S.A)	0	2621454	2621454	2621454	2621454	2621454
CV	0	2122192	2122192	2122192	2122192	2122192
Total pagos	18500262,8	4386279	4386279	4386279	4386279	4386279
Total cobros	0	11550000	11550000	11550000	11550000	11550000
Cobros-Pagos (MF)	-18500262,8	7163721	7163721	7163721	7163721	7163721
MF Acumulado	-18500262,8	-1,1E+07	-4172822	2990899	10154620	17318340
MF Actualizado	-18500262,8	6512473	5920430	5382209	4892918	4448107
Años	6	7	8	9	10	
Inversión	0	0	0	0	0	
CF (S.A)	2621454	2621454	2621454	2621454	2621454	
CV	2122192	2122192	2122192	2122192	2122192	
Total pagos	4386279	4386279	4386279	4386279	4386279	
Total cobros	11550000	11550000	11550000	11550000	11550000	
Cobros-Pagos (MF)	7163721	7163721	7163721	7163721	7163721	
MF Acumulado	24482061	31645782	38809502	45973223	53136943	
MF Actualizado	4043734	3676121	3341929	3038117	2761924	

Anexo 41. Continuación

Tabla 41.2 Flujo de caja para la variante B2

Interés	0,1					
Años	0	1	2	3	4	5
Inversión	11919312,00	0	0	0	0	0
CF (S.A)	0	1832046,31	1832046,31	1832046,31	1832046,31	1832046,31
CV	0	1676853,07	1676853,07	1676853,07	1676853,07	1676853,07
Total pagos	11919312,00	3277658,08	3277658,08	3277658,08	3277658,08	3277658,08
Total cobros	0	8085000,00	8085000,00	8085000,00	8085000,00	8085000,00
Cobros-Pagos (MF)	-11919312,00	4807341,92	4807341,92	4807341,92	4807341,92	4807341,92
MF Acumulado	-11919312,00	-7111970,08	-2304628,16	2502713,76	7310055,68	12117397,60
MF Actualizado	-11919312,00	4370310,84	3973009,85	3611827,14	3283479,22	2984981,11
Años	6	7	8	9	10	
Inversión	0	0	0	0	0	
CF (S.A)	1832046,31	1832046,31	1832046,31	1832046,31	1832046,31	
CV	1676853,07	1676853,07	1676853,07	1676853,07	1676853,07	
Total pagos	3277658,08	3277658,08	3277658,08	3277658,08	3277658,08	
Total cobros	8085000,00	8085000,00	8085000,00	8085000,00	8085000,00	
Cobros-Pagos (MF)	4807341,92	4807341,92	4807341,92	4807341,92	4807341,92	
MF Acumulado	16924739,52	21732081,44	26539423,36	31346765,28	36154107,20	
MF Actualizado	2713619,19	2466926,53	2242660,49	2038782,26	1853438,42	