



Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería en Medioambiente
Ingeniería Ambiental

**DISEÑO DE UN DIGESTOR PARA LA VALORIZACIÓN
ENERGÉTICA DE LOS RESIDUOS ORGÁNICOS SÓLIDOS
GENERADOS EN LA VIÑA ERRÁZURIZ MEDIANTE LA DIGESTIÓN
ANAEROBIA**

TRABAJO DE TÍTULO

**AUTORA: MARIANA SILVA TELLO
PROFESORA GUÍA: ROMINA ÁLVAREZ ALARCÓN**

VALPARAÍSO, 2024

Resumen

La Viña Errázuriz, empresa vitivinícola reconocida a nivel mundial, implementa estrategias de gestión medioambiental responsables, entre las cuales destaca la sostenibilidad en el manejo de sus residuos. Actualmente sus residuos orgánicos sólidos son externalizados, sin embargo, cabe la posibilidad de que este residuo presente un potencial de producción de biogás mediante la digestión anaerobia.

Se inició la evaluación de valorización del residuo mediante el ensayo de Potencial Bioquímico de Metano (PBM), donde se analizaron 4 muestras que combinaron relaciones Carbono-Nitrógeno (C/N) de 18 y 20 y cantidades de 8% y 15% de sólidos. La M4, con 15% de sólidos y C/N de 20, presentó un valor de 379,225 ml de CH₄ por g de sólido volátil. Los digestatos presentaron contenidos de NPK, sin embargo, su potencial biofertilizante requiere un análisis cuantitativo detallado.

Con los parámetros de la muestra M4, se diseñó un digestor discontinuo de 400 m³ capaz de tratar lotes de hasta 205.640 kg de residuos en un ciclo de 29 días, produciendo aprox. 62.387 m³ de metano por lote. Además, se establecieron sistemas de pretratamiento, agitación, limpieza de biogás mediante eliminación de agua y gestión del digestato por separación de fases.

Finalmente, se evaluó la utilización del biogás producido en reemplazo de gas licuado, lo que permitió establecer que la producción de un lote puede cubrir el consumo de las calderas que funcionan durante la temporada de vendimia.

El estudio demostró que el residuo en efecto posee cualidades que lo transforman en un buen candidato para generar biogás mediante la digestión anaerobia. Las cantidades generadas de este residuo en la Viña Errázuriz, bajo pretratamientos y parámetros establecidos para optimizar el proceso, podrían producir suficiente biogás para cubrir parte del consumo de gas licuado.

Agradecimientos

*A mi maravillosa familia
Siempre alentándome a llegar lejos
Y a dar lo mejor de mí*

*A mis amigos
Por darme seguridad
Y enseñarme a no dudar de mis conocimientos*

*A los profesores de esta hermosa escuela
Por su disposición y profesionalidad al momento de educar
Por guiarme en este proceso
Y ayudarme a no tropezar o dudar*

*A Constanza y Ángelo
Por compartir conmigo los altibajos de la vida universitaria
Y suavizar la complejidad del recorrido*

*A mi papá
Por incentivarme a extender mis conocimientos
Y enseñarme que la vida es un paisaje lleno de posibilidades
Que sólo yo puedo forjar*

*Y a mi mamá
Por siempre confiar en mí
Y apoyarme incondicionalmente
En cada paso de mi formación, personal y profesional*

Índice

1. Introducción.....	1
1.1 Generación y gestión de residuos sólidos: escenario mundial y nacional	1
1.2 Residuos orgánicos sólidos y gestión actual.....	3
1.3 Industria vitivinícola en Chile: residuos y gestión	5
1.4 Viñedos Familia Chadwick: Viña Errázuriz.....	7
1.5 Biogás en Chile.....	10
2. Problemática	11
3. Objetivos.....	12
3.1 Objetivo general	12
3.2 Objetivos específicos	12
4. Revisión Bibliográfica.....	13
4.1 Plantas de biogás: energía renovable.....	13
4.2 Digestores anaerobios.....	17
4.2.1 Tipos de digestores	17
4.2.1.1 Sistemas pasivos	17
4.2.1.2 Sistemas “Low Rate”	18
4.2.1.3 Sistemas “High Rate”	19
4.2.2 Condiciones ambientales y de operación.....	23
4.3 Digestión anaerobia	25
4.3.1 Etapas de la digestión anaerobia.....	26
4.3.2 Biogás	28
4.3.2.1 Usos del biogás.....	29
4.3.3 Digestato	30
4.4 Ensayo de Potencial Bioquímico de Metano.....	31

4.4.1.1	Sustrato	32
4.4.1.2	Inóculo	33
4.4.1.3	Parámetros y factores de operación	35
4.4.1.4	Métodos de medición de biogás	35
4.4.1.5	Frecuencias de muestreo y duración del ensayo.....	37
5.	Materiales y Métodos	38
5.1	Caracterización de los residuos orgánicos generados en la Viña Errázuriz durante la temporada de vendimia.....	38
5.1.1	Cuantificación de los residuos orgánicos	38
5.1.2	Caracterización del residuo orgánico	38
5.1.2.1	Determinación de sólidos totales.....	39
5.1.2.2	Determinación de sólidos volátiles.....	40
5.1.2.3	Determinación de humedad.....	41
5.1.2.4	Determinación de pH.....	41
5.1.2.5	Composición fisicoquímica del material del residuo	42
5.1.2.6	Determinación de propiedades químicas	42
5.2	Determinación del potencial de generación de biogás y fertilizante	44
5.2.1	Preparación y montaje del ensayo PBM.....	44
5.2.1.1	Preparación de sustrato	44
5.2.1.2	Obtención y preparación del inóculo.....	45
5.2.1.3	Contenido de reactores	45
5.2.1.4	Ajustes de pH.....	46
5.2.1.5	Control de temperatura	46
5.2.1.6	Sistema de medición de volumen de biogás producido.....	47
5.2.2	Desarrollo del ensayo Potencial Bioquímico Metanogénico.....	48
5.2.3	Modelo de regresión	49
5.2.4	Evaluación de digestato	51
5.3	Diseño de digestor anaerobio y sistemas complementarios	52

5.3.1 Selección de biodigestor	52
5.3.2 Diseño del digestor	53
5.3.3 Diseño de sistemas complementarios	55
5.4 Análisis comparativo al utilizar biogás como sustituto energético	56
5.4.1 Consumo energético de la Viña Errázuriz	56
5.4.2 Análisis comparativo al utilizar biogás como reemplazo	57
6. Resultados.....	58
6.1 Resultados de cuantificación y caracterización de los residuos orgánicos sólidos	58
6.1.1 Cuantificación de ingresos de uva	58
6.1.2 Cuantificación de residuos.....	59
6.1.3 Caracterización del residuo	61
6.1.3.5 Composición fisicoquímica	62
6.1.3.6 Análisis de Laboratorio Externo	64
6.2 Resultados determinación del potencial de generación de biogás y fertilizante	65
6.2.1 Preparación y montaje	65
6.2.2 Resultados de ensayo PBM	68
6.2.2.1 Producción acumulada.....	69
6.2.2.2 Potencial metanogénico y productividad.....	72
6.2.2.3 Diseño experimental y regresión	74
6.2.3 Características del digestato y propiedades fertilizantes	76
6.2 Resultados de diseño de digestor anaerobio y sistemas complementarios.....	78
6.2.1 Selección del digestor.....	78
6.3.2 Diseño del digestor	78
6.4 Resultados de análisis comparativo de utilización de biogás como sustituto energético	86
6.4.1 Consumo energético de la Viña Errázuriz	86
6.4.2 Características de biogás producido	88
6.4.3 Selección de utilización de biogás.....	89

6.4.4	Situación actual de calderas.....	89
6.4.5	Situación con utilización de biogás	91
7.	Discusión	94
7.1	Sobre cuantificación y caracterización del sustrato.....	94
7.2	Sobre resultados de ensayo PBM y cálculos de productividad	94
7.3	Sobre el diseño del digestor anaerobio y sus complementos	97
7.4	Sobre la utilización de biogás como reemplazo energético.....	97
8.	Conclusión.....	99
9.	Bibliografía.....	100

Índice de Tablas

Tabla 4.1: Rangos de temperatura y tiempo de fermentación anaerobia.....	24
Tabla 4.2: Composición de biogás dependiendo del sustrato utilizado.....	28
Tabla 5.1: Metodologías utilizadas para la determinación de propiedades químicas..	43
Tabla 5.2: Volumen de digester dependiendo de la masa de sustrato alimentada	54
Tabla 6.1: Ingresos de uva anuales.	58
Tabla 6.2: Cantidad de residuos orgánicos anuales declarados en SINADER.....	59
Tabla 6.3: Valores experimentales de la caracterización del residuo.	62
Tabla 6.4: Valores experimentales del análisis de laboratorio externo.	64
Tabla 6.5: Resultados caracterización de estiércol de vacuno.....	65
Tabla 6.7: Variables establecidas para cada muestra.	66
Tabla 6.8: pH medidos en muestras ajustadas y volúmenes de NaOH adicionados.	67
Tabla 6.9: Promedios y desviaciones estándar del PBM de cada muestra.	69
Tabla 6.10: Potencial bioquímico metanogénico promedio de las diferentes muestras.	72
Tabla 6.11: Productividad promedio de todas las muestras.	73
Tabla 6.12: Variables codificadas para calcular los efectos del diseño 2 ²	74
Continuación tabla 6.12: Variables codificadas para calcular los efectos del diseño 2 ²	75
Tabla 6.17: Coeficientes utilizados en la ecuación de regresión para Potencial Metanogénico.	75
Tabla 6.18: Coeficientes utilizados en la ecuación de regresión para Productividad.....	76
Tabla 6.19: Presencia de compuestos NPK en digestatos obtenidos.....	77
Tabla 6.20: Dimensiones del digester.	80
Tabla 6.21: Generación de residuos durante meses de vendimia 2024.	80
Tabla 6.22: Generación y acumulación de residuos durante cada ciclo de digestión.	81

Tabla 6.23: Consumo de electricidad en la Viña Errázuriz.....	87
Tabla 6.24: Consumo de petróleo en la Viña Errázuriz.	87
Tabla 6.25: Consumo de gas licuado en la Viña Errázuriz.	88
Tabla 6.26: Consumo de calderas y emisiones asociadas..	90
Tabla 6.27 Tiempos de funcionamiento de cada caldera.....	90
Tabla 6.28: Consumo aproximado de biogás de cada caldera.....	92
Tabla 6.29: Consumo mensual requerido por cada caldera.....	92

Índice de Figuras

Figura 1.1 Diagrama de Procesos de Enología y Producción de Vino.....	9
Figura 4.1: Diagrama general de plantas de biogás.....	13
Figura 4.2: Esquema de sistema de digestión anaerobia en lagunas cubiertas.....	17
Figura 4.3: Esquema de reactores sin retención interior de biomasa.	18
Figura 4.4: Diagrama de digestor de flujo pistón.	19
Figura 4.5: Esquema de un sistema de lecho fijo para el tratamiento de estiércol animal.	20
Figura 4.6: Esquema de un sistema de AFBR.....	21
Figura 4.7: Esquema de un sistema de UASB.....	21
Figura 4.8: Secuencia de operación de un reactor Batch.....	22
Figura 4.9: Etapas de operación de un reactor ASBR (1) alimentación, (2) reacción, (3) sedimentación (4) descarga..	22
Figura 4.10: Esquema de reacciones de la digestión anaeróbica de materiales poliméricos.....	26
Figura 5.1: Balanza de humedad utilizada PCE INSTRUMENTS, Serie PCE-MA.....	41
Figura 5.2: Multiparámetro Hanna utilizado.	42
Figura 5.3 Estiércol de vacuno utilizado.	45

Figura 5.4: Medidor de pH Oakton utilizado.	47
Figura 5.5: Método volumétrico por desplazamiento de líquido.	47
Figura 5.6: Kit utilizado para medición de NPK y pH.	51
Figura 5.7: Centrífuga CGOLDENWALL (Mini-10k) utilizada.	52
Figura 6.1: Ingresos mensuales de uva durante temporada de vendimia 2024.	59
Figura 6.2: Cantidades generadas de residuos orgánicos sólidos durante vendimia de 2024...60	60
Figura 6.3: Porcentajes en peso de residuos y vino generados del total de uva recibida en vendimia 2024.	60
Figura 6.4: Depósitos de residuos orgánicos sólidos en patio de vendimia Viña Errázuriz.....	61
Figura 6.5: Muestras del residuo orgánico en bandejas para secado.....	62
Figura 6.6: Residuos orgánicos sólidos generados en Viña Errázuriz.	63
Figura 6.7: Distribución de los principales compuestos bioactivos en los componentes del orujo de uva.....	63
Figura 6.8: Baño termostatzado montado.....	68
Figura 6.9: Sistema de medición montado para medir el biogás.....	68
Figura 6.10: Promedio de volumen acumulado de biogás en el tiempo de muestras M1.	69
Figura 6.11: Promedio de volumen acumulado de biogás en el tiempo de muestras M2.	70
Figura 6.12: Promedio de volumen acumulado de biogás en el tiempo de muestras M3.	70
Figura 6.13: Promedio de generación acumulada de biogás en el tiempo de muestras M4.	71
Figura 6.14: Promedio de volúmenes acumulados de biogás en el tiempo de todas las muestras.	71
Figura 6.15: Productividad promedio de metano para las muestras M1, M2, M3 y M4.	73
Figura 6.16: Productividad promedio de metano para las muestras M1, M2, M3 y M4.	74
Figura 6.17.: Diagrama del proceso de digestión anaerobia del residuo, incluyendo sistemas complementarios.....	81

Figura 6.18.: Dimensiones de galpón de almacenamiento.	82
Figura 6.19: Triturador Gamma Modelo TR 50.....	83
Figura 6.20: Agitador agriKomp PADDELGIGANT.....	84
Figura 6.21: Separador de fases Quetschprofi, agriKomp.....	85

Acrónimos

AFBR: Anaerobic fluidized bed reactor
ASBR: Anaerobic sequencing batch reactor
BSTR: Batch stirred tank reactor
CH ₄ : Metano
C/N: Relación Carbono-Nitrógeno
GEI: Gases de efecto invernadero
Headspace: Espacio de cabeza o libre
MINENERGIA: Ministerio de energía
MMA: Ministerio de medio ambiente
PBM: Potencial bioquímico de metano
RILES: Residuos industriales líquidos
RSU: Residuos sólidos urbanos
SINADER: Sistema nacional de declaración de residuos
S/I: Relación sustrato inóculo
UASB: Up flow anaerobic sludge blanket reactor
VFCH: Viñedos familia chadwick

1. Introducción

1.1 Generación y gestión de residuos sólidos: escenario mundial y nacional

Desde el comienzo de la historia de la humanidad, nos hemos visto envueltos como especie en el medio ambiente y sus condiciones, principalmente por la utilización de sus diferentes atributos que transformamos en recursos esenciales para subsistir, crecer económicamente, avanzar en tecnologías y evolucionar como sociedad.

La utilización de estos recursos naturales no solo trajo consigo beneficios, sino que también nuevas preocupaciones, siendo algunas de ellas el incremento de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), el cambio climático y la generación y gestión de residuos, situaciones que en la actualidad engloban las problemáticas ambientales mundiales que la humanidad debe enfrentar. A lo largo de las décadas, han ocurrido eventos e instancias como la Cumbre de la Tierra en Río el año 1992, la creación del acuerdo de Kioto en 1997, el acuerdo de París del 2016, por nombrar algunas, todas con el objetivo de advertir a la humanidad y ayudarle a enfocar sus miradas, en conjunto, hacia la importancia de actuar con estrategias para reducir el avance y el desarrollo de estas y otras problemáticas mundiales.

La excesiva producción industrial y consumo humano ha llevado al mundo a una trayectoria de eliminación de residuos donde se espera que para el 2050 la generación de residuos superará el crecimiento demográfico en más del doble, según lo publicado en el documento “What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050”. Esta nueva realidad presenta escenarios críticos similares a lo largo de todo el mundo; la generación de GEI por los vertederos o rellenos sanitarios, la contaminación de ecosistemas, del recurso hídrico y del suelo, la proliferación de vectores, la generación de microbasurales, lixiviados y problemas sanitarios.

Según lo señalado en el documento del párrafo anterior, al año 2016 se estimaba la generación de 2.010 billones de toneladas de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) en el mundo, por lo que aproximadamente cada persona generó 0,74 kg de residuos al día, donde las diferentes regiones de Asia, Europa y Norte América son las que más generan.

Para el caso de Chile, el año 2021 generó cerca de 19,6 millones de toneladas de residuos donde la mayoría de estos corresponden a residuos no peligrosos (96,7%), siendo 49% residuos de

origen industrial, 46,1% residuos sólidos urbanos o municipales y un 1,6% lodos provenientes de Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas, según el Reporte del Estado del Medio Ambiente del Sistema Nacional de Información Ambiental (SINIA) del 2023.

Respecto a los RSU, aquellos que son principalmente desechos domésticos, comerciales o institucionales, recolectados por municipalidades y otras autoridades locales, el reporte de SINIA estima que un 45% del total generado proviene de la región Metropolitana y que más del 50% de estos corresponde a residuos orgánicos.

Por otro lado, las mayores cantidades de formación de residuos industriales provienen de actividades como la generación, transmisión y distribución de energía, la fabricación de papel, la elaboración de productos alimenticios y la industria agrícola y ganadera. Las regiones que destacan en la generación de estos residuos son la Metropolitana, Antofagasta y del Biobío (ASIVA, 2017).

Con respecto a las normativas asociadas a la gestión de residuos en Chile, existen reglamentos relacionados al manejo de residuos peligrosos y no peligrosos, que establecen requerimientos tanto para los generadores de residuos, como para los destinatarios. Una de las normativas más recientes es la Ley 20.920, que establece marcos regulatorios para la gestión de residuos, la responsabilidad extendida del productor y el fomento al reciclaje, que tiene como principal instrumento la Responsabilidad Extendida del Productor (REP), un mecanismo en virtud del que los productores de productos prioritarios son responsables de la organización y financiamiento de la gestión de los residuos derivados de la comercialización de sus productos en el país (MMA, 2016).

En relación con el cumplimiento de estos requerimientos establecidos en la normativa asociada a la gestión de residuos, se han creado diferentes sistemas y plataformas para llevar un seguimiento de los datos importantes, algunos se mencionan a continuación:

Sistema Nacional de Declaración de Residuos (SINADER): plataforma que permite a generadores, destinatarios y gestores de residuos, dar cumplimiento a las obligaciones indicadas en el Reglamento del Registro de Emisiones y Transferencias de Contaminantes (RETC), mediante la declaración de residuos no peligrosos en periodos anuales o mensuales (MMA 2021).

Ventanilla Única del RETC: plataforma de registro e individualización de los establecimientos que deben reportar información. Ayuda a estandarizar y sistematizar la información de un

establecimiento, facilitar el acceso a la información y mejorar los reportes en línea (MMA, 2014).

Sistema de Declaración y Seguimiento Electrónico de Residuos Peligrosos (SIDREP): sistema electrónico creado para facilitar la elaboración y envío de las declaraciones de residuos peligrosos para dar cumplimiento al Reglamento Sanitario sobre Manejo de Residuos Peligrosos (MINSAL, 2010).

1.2 Residuos orgánicos sólidos y gestión actual

Una importante fracción de los residuos sólidos generados en Chile corresponde a los residuos orgánicos: desechos biodegradables de origen animal o vegetal, compuestos por altos porcentajes de agua, nitrógeno y materia orgánica, los que pueden descomponerse mediante procesos biológicos naturales.

Según lo estipulado en la Estrategia Nacional de Residuos Orgánicos del 2020, estos representan más de la mitad de la composición de los residuos domiciliarios y corresponden a una considerable porción de los residuos de tipo industrial. Algunas actividades productivas que generan grandes cantidades de residuos orgánicos pueden ser las empresas agrícolas y ganaderas, la piscicultura, el tratamiento de aguas residuales, comercios de venta de alimentos, empresas productoras industriales, entre otras.

En el mundo, la gestión de los RSU consiste en la eliminación final en rellenos sanitarios, aproximadamente el 40% de ellos, el 33% es abandonado abiertamente, 19% es recuperado a través de reciclaje o compostaje y 11% es tratado mediante incineración (What a Waste, 2018). Chile no es diferente al resto del mundo en lo que respecta a la gestión de estos residuos, ya que lo más común es disponer de los RSU (tanto de la fracción orgánica como la inorgánica) en vertederos o rellenos sanitarios, que cumplan con las normativas sanitarias y ambientales, y específicamente la fracción orgánica se estima que posee una tasa de valorización inferior al 1% (MMA, 2020). Disponer de la fracción orgánica de esta manera no solo empeora el escenario y la problemática mencionada en el punto anterior, sino que también produce un desaprovechamiento de sus cualidades y potencial para generar un valor.

La importancia de poder entregar un valor a estos residuos orgánicos sólidos radica en disminuir todos los impactos negativos que genera la gestión común actual, por lo que la utilización de

diferentes alternativas de valorización es esencial. Algunas de las opciones más comunes se presentan a continuación:

Compostaje: la más común de las alternativas es el proceso biológico en presencia de oxígeno, donde los microorganismos, como hongos y bacterias, bajo condiciones óptimas de temperatura humedad y aireación, degradan la materia orgánica. Se puede obtener compost para los jardines y puede llevarse a cabo de maneras muy simples y sin grandes dificultades (Mapeko, 2022).

Vermicompostaje: parecido al compostaje, pero el proceso lo desarrollan particularmente los microorganismos presentes en el sistema digestivo de las lombrices, generando un producto llamado vermicompost o humus, fertilizante orgánico natural (Procycla, 2021).

Generación de subproductos: algunas empresas productivas se dedican únicamente a recibir grandes cantidades de residuos orgánicos sólidos provenientes de diferentes procesos productivos y los transforman a diferentes nuevos subproductos alimenticios, licores, farmacéuticos y hasta cosméticos.

Digestión Anaerobia: proceso biológico que ocurre en ausencia de oxígeno, donde microorganismos degradan la materia orgánica y se obtiene biogás, que puede ser utilizado como energía renovable, y un subproducto conocido como digerido, que puede funcionar como fertilizante orgánico natural.

Existe una gran variedad de alternativas convencionales para el tratamiento de residuos orgánicos sólidos, sin embargo el tratamiento mediante la utilización de tecnologías anaerobias surge como una opción beneficiosa en múltiples aspectos, dado que permite lidiar de una manera más eficiente con los sustratos con altos contenidos de sólidos, al no requerir oxígeno disminuyen los consumos energéticos de los reactores, genera biogás el que se considera una energía renovable y además un digestato que puede ser utilizado como biofertilizante.

Por todas las razones presentadas es que el uso de este tipo de tecnologías está incrementando rápidamente en los diferentes sectores productivos que requieren gestionar sus residuos orgánicos sólidos, apuntando principalmente al tratamiento de aguas residuales o deyecciones animales resultantes de la cría y engorda.

1.3 Industria vitivinícola en Chile: residuos y gestión

En la actualidad, Chile es el mayor productor de vino en Latino América y uno de los principales exportadores en el mundo, con el 7,8% del volumen y 4,9% del valor total de exportaciones globales de vino en 2021 (Reinecke y Torres, 2023). Al mismo tiempo, es una de las industrias más relevantes para la economía chilena, aportando un 0,5% al PIB nacional (Statista, 2024). Este producto representa el 16,5% del total de las exportaciones agropecuarias, donde también representa un 5,7% de las exportaciones que no son cobre (Wines of Chile, 2023). A lo largo del 2023, las exportaciones de vino embotellado sumaron US\$1.233,6 millones, registrando una baja en comparación al año 2022, atribuido a consecuencias después de la pandemia Covid-19 (Gutiérrez, 2024).

Según el Catastro Vitícola Nacional del año 2022 del Sistema Agropecuario y Ganadero (SAG), las plantaciones de vides para vinificación alcanzaron una superficie de 129.016,54 hectáreas, donde la Región del Maule concentra el 40,7%, la de O'Higgins el 32,1%, la de Ñuble un 8,06% y la Metropolitana un 8,06%. Existen 15 valles vitivinícolas en casi 1500 Km, 356 viñas y 1.3000 millones de litros de producción y una superficie destinada que representa un 85% de las plantadas a nivel nacional (PROCHILE, 2023).

La producción de vinos en Chile alcanzó un valor total de 1.103.031.478 litros el año 2023, siendo el Maule, O'Higgins y la Metropolitana las mayores regiones productoras (SAG, 2023), donde sólo en la Región de O'Higgins el primer trimestre del 2024 las exportaciones de vino sumaron un total de US\$82,1 millones (INE, 2024). Es evidente que la industria vitivinícola se consolida como una de las más importantes a nivel nacional, no solo en aspectos económicos, sino que también sociales y culturales, por las conocidas épocas de vendimia que se celebran en algunas comunas y por la importancia histórica de las primeras familias emprendedoras y productoras de vinos antiguos.

El proceso productivo del vino inicia con el cultivo y la mantención de las vides, la recepción de las uvas en la temporada de vendimia entre los meses de febrero y abril, para ser preparadas e ingresadas al proceso de fermentación y producción. A continuación, la fermentación alcohólica genera una variedad de residuos, donde los sólidos orgánicos representan aproximadamente el 80 – 85% del total generado y el orujo es el principal componente (62%), le siguen las borras o lías (14%), e igualmente los escobajos o raspones (12%) y lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales (12%) (Uriel, 2019).

Para obtener 1 litro de vino se requieren aproximadamente 1,3 a 1,5 kilos de uva (WINE, 2023). Se estima que, del total de la uva, el orujo constituye aproximadamente entre el 15 y el 20% de su peso (Bordiga, Travaglia y Locatelli, 2019). Llevando estos datos a la realidad chilena, donde el año 2023 se produjeron 1.103.031.478 litros, y considerando lo mencionado anteriormente, se estima que se requirió aproximadamente de 1.165.547.217 kg de uva para producir esas cantidades de vino, lo que habría resultado en 330.909.443 kg de orujo.

Si bien a nivel nacional no existen datos exactos sobre la gestión específica del orujo como residuo orgánico sólido, se reconocen algunas gestiones excepcionales en algunas viñas nacionales, como lo es el caso de la Viña Concha y Toro que cuenta con el 98% de sus residuos industriales con alternativas de valorización, las cuales se destinan a reciclaje o reutilización a través de su programa “Innovación Circular” y, en lo que respecta a residuos orgánicos sólidos, practican el compostaje del 100% de sus cantidades generadas, según lo que publicaron en su Informe de Impactos del 2022.

La Viña Veramonte posee el 100% de sus viñedos certificados como orgánicos, sin requerir el uso de agroquímicos. En un artículo publicado en la página web “El Mostrador” el 2021, el Gerente General José Aguirre menciona que generan un compost con los residuos de las vendimias sumado a otros compuestos, para reutilizarlos en los suelos de los campos vinícolas. En el mismo artículo se mencionan otras viñas como Viu Manent que busca liderar en lo que se conoce como “Enoturismo Sustentable”, donde una de sus medidas es abastecer el 100% de las operaciones de turismo con una planta de paneles solares voltaicos, según el Gerente General de la empresa.

En lo que respecta a la digestión anaerobia y su atributo principal, que es la generación de un digerido y biogás, puede ser de mucha utilidad tanto en los campos de viñedos como para la industria productiva del vino, lo que la convierte en una alternativa sustentable e ideal para gestionar los residuos orgánicos sólidos generados en esta actividad industrial. Un gran ejemplo que cabe mencionar es la gestión que desarrolla la Viña San Pedro con su planta de biogás en la ciudad de Molina, Región del Maule, que tiene una potencia instalada de 1000kW y abastece a la viña utilizando sus propios residuos orgánicos sólidos (MINENERGÍA, 2017).

1.4 Viñedos Familia Chadwick: Viña Errázuriz

La Viña Errázuriz, actualmente llamada Viñedos Familia Chadwick (VFCH), fue fundada en 1870 por Don Maximiano Errázuriz, cuando descubrió que el Valle del Aconcagua tenía un potencial para obtener “de la mejor tierra, el mejor vino”. En la actualidad, a más de 150 años después de su fundación, la viña ha sido premiada como la mejor de Chile (2017) por “Extraordinary Winery Awards”, sus vinos destacan a nivel mundial y han sido pioneros en plantar viñedos de Syrah, entre otros logros.

Al presente año 2024, los VFCH cuentan con 11 instalaciones a nivel nacional, entre oficinas corporativas y campos de viñedos. Una de estas instalaciones corresponde a la conocida Viña Errázuriz, ubicada en la Región de Valparaíso, en la comuna de Panquehue, cuenta con una cantidad aproximada de 160 trabajadores (número que aumenta en época de vendimia). La planta posee diferentes áreas especializadas para llevar a cabo el proceso completo de recepción de uvas, producción y despacho de vinos (Ver Figura 1.1).

La operación de la planta productiva considera las siguientes etapas para la elaboración del vino (blanco y tinto) tanto envasado como a granel:

Lavado de maquinarias y equipos: previo a recibir las uvas, se realiza mantención y limpieza de todas las maquinarias, desde la cámara de frío donde se almacena la uva hasta la entrega del vino listo al área de producción. Esta limpieza se realiza cada vez que estos equipos hayan entrado en contacto con el mosto y el vino, o cuando se deba hacer un trabajo. A resultado de esta actividad se generan residuos industriales líquidos.

Recepción y preparación: Las uvas recolectadas llegan en camiones los que se pesan y taran. Luego, las uvas pasan por análisis de calidad (GAP, pH y acidez) y finalmente son descargadas y transportadas a las máquinas despalladoras, donde se separan los granos de uva del escobajo, hojas y restos orgánicos.

Prensado y clarificación: Los granos de uva blanca se prensan y el mosto obtenido es direccionado a las cubas en bodegas de vino blanco, previamente seleccionadas y preparadas para comenzar a clarificar, proceso en el que se lava y limpia el mosto. Una vez terminado el proceso se redirige el resultado a nuevas cubas para comenzar el proceso de la fermentación.

Prensado y vinificación: Los granos de uva negra pasan también por el prensado, el mosto obtenido se redirecciona a las cubas en las bodegas de vino tinto, donde se va a desarrollar el proceso de fermentación, con ayuda de levaduras y temperaturas controladas.

Fermentación y producción: El proceso continuo con la fermentación, fase que consiste en adicionar levaduras seleccionadas para convertir los azúcares del mosto en alcohol, bajo temperaturas y tiempos definidos.

Finalizada la fermentación, las cubas se vacían y el vino se trasiega a barricas por unos meses, para después regresar a cubas a ser clarificado, filtrado y almacenado en estanques o enviado a la zona de producción, donde se envasa en botellas de vidrio y posteriormente se comercializa al mercado nacional e internacional.

En la actualidad, la gestión de residuos de la Viña Errázuriz involucra los residuos peligrosos y no peligrosos. En lo que respecta a residuos orgánicos, poseen una planta de tratamiento de RILES que funciona bajo una RCA obtenida el 2022 y entró en operación a inicios del 2024. Esta recibe todas las aguas residuales resultantes del proceso productivo e incluso las de limpieza de equipos. Por otro lado, los residuos orgánicos sólidos generados y gestionados son el orujo y el escobajo principalmente, los que resultan de los procesos de despaletizado y prensado de la uva (ver figura 1.1). Estos son retirados por la empresa “Industrias Vínicas S.A.” ubicada en Providencia, Región Metropolitana, la que genera diferentes subproductos, entre ellos compost.

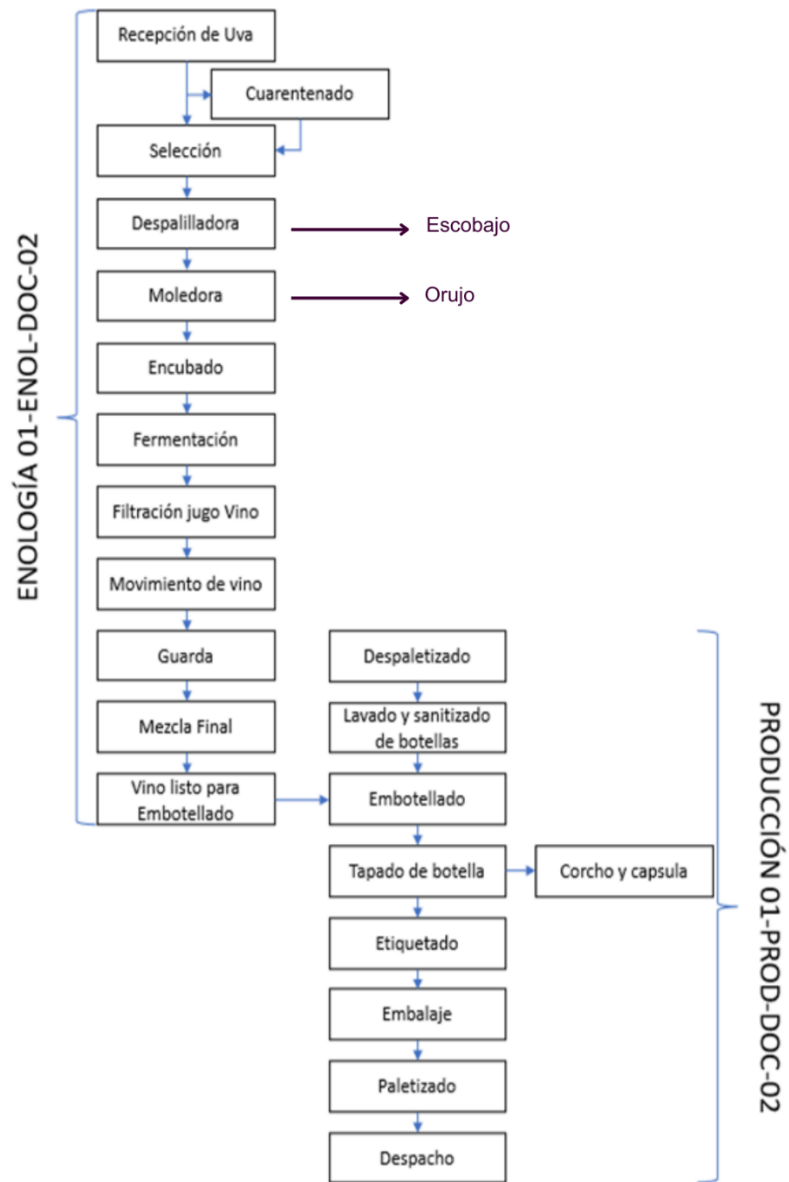


Figura 1.1 Diagrama de Procesos de Enología y Producción de Vino de VFCH. (Procedimiento Ambiental VFCH).

1.5 Biogás en Chile

En Chile se generó un amplio desarrollo de plantas de biogás durante la década del 2010, según un estudio de la Comisión Nacional de Energía el mismo año, la mayor producción potencial de biogás se podría generar entre la región de Valparaíso y la Araucanía dentro de los próximos años. Las actividades mejor asociadas a este potencial son las del sector agropecuario, los lodos generados en plantas de tratamiento de aguas servidas y la agroindustria, que engloba la producción, industrialización y comercialización de productos agrícolas.

Al pasar de los años, se ha mostrado un considerable avance de la implementación de estas tecnologías, tanto así que al año 2020 el Ministerio de Energía registró un total de 38 instalaciones a nivel nacional, cuyo sector principal es la agroindustria y los sustratos más usados son los Residuos Industriales Líquidos (RILES), el purín de animales, lodos resultantes del tratamiento de RILES y RSU.

La normativa asociada a la utilización de energías renovables y no convencionales ha tomado fuerza en la última década, principalmente con la promulgación de leyes como la 21.305, que establece la elaboración de planes nacionales de eficiencia energética cada 5 años con el objetivo de obligar a grandes consumidores a implementar planes de gestión de energía, y también con el caso de la Ley 20.257, que promueve el uso eficiente de energías renovables, entre ellas, el biogás (MINENERGÍA, 2021).

La alternativa principal para la obtención del biogás es la digestión anaerobia (ya mencionada en el inicio de esta introducción y posteriormente más definida), la cual presenta múltiples beneficios, como ser una alternativa para el reemplazo de los combustibles fósiles, permitir el tratamiento de residuos orgánicos mediante procesos que no se encuentran limitados por el uso de oxígeno y además generando menos residuos en el proceso en comparación con otras tecnologías de tratamientos. Por estas razones, esta alternativa se posiciona como una tecnología novedosa y útil que trae grandes potenciales energéticos para la diversificación de la matriz energética chilena y además permitiría aliviar en cierto grado la problemática generada por el exceso de residuos y sus gestiones actuales.

2. Problemática

En Chile se generan cerca de 20 millones de toneladas de residuos al año, lo que se traduce a un aproximado de 1,15 kg al día per cápita, cifras que destacan al país como uno de los más grandes generadores en Latino América, donde la gran mayoría corresponde a residuos no peligrosos y aproximadamente el 49% corresponde a residuos de origen industrial. De estos residuos, una fracción importante es representada por los sólidos orgánicos, cuya gestión actual considera principalmente la disposición final en vertederos o rellenos sanitarios y el compostaje.

Es así como en la actualidad existe un escenario crítico por la disposición final de residuos sólidos en vertederos, donde las alternativas de gestión para residuos inorgánicos son mucho más variadas y practicadas, mientras que, para la fracción orgánica, si bien es variada, sólo se desarrollan pocas y las más simples. Por esta razón es que la evaluación de alternativas que puedan generar un valor a los residuos orgánicos sólidos se vuelve cada vez más importante y necesaria para poder aliviar la problemática resultante por la generación y disposición de estos. Así, la opción de aprovechamiento mediante la utilización de tecnologías de digestión anaerobia surge como una solución viable y sustentable para la gestión de residuos sólidos orgánicos.

Bajo este contexto, la Viña Errázuriz es una industria productora de vino ubicada en la Región de Valparaíso, la cual recibe cientos de kilogramos de uva al año durante la temporada de vendimia y genera, mediante sus procesos de prensado y fermentación, cantidades considerables de residuos sólidos orgánicos. Estos son transportados a una empresa que se dedica a la elaboración de compost y otros subproductos, sin embargo, surge la pregunta de si este residuo, dadas sus características y cantidades, podría cumplir con los requisitos necesarios para ser gestionado y valorizado por la Viña Errázuriz mediante el proceso de la digestión anaerobia.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Diseñar un digestor para la valorización energética, mediante la digestión anaerobia, de los residuos orgánicos sólidos generados en la Viña Errázuriz.

3.2 Objetivos específicos

- Caracterizar los residuos orgánicos sólidos generados en la Viña Errázuriz durante la temporada de Vendimia.
- Determinar el potencial de generación de biogás y de fertilizante de los residuos orgánicos sólidos generados durante la temporada de vendimia en la Viña Errázuriz.
- Determinar los parámetros de diseño de un digestor anaerobio y sus sistemas complementarios.
- Analizar la utilización del biogás producido como sustituto energético.

4. Revisión Bibliográfica

4.1 Plantas de biogás: energía renovable

Una planta de biogás es una instalación compuesta por una variedad de elementos, cuya disposición y características van a depender principalmente del tipo de sustrato alimentado y sus cantidades. Cada planta está diseñada para procesar y tratar al sustrato en su totalidad, orientando así el curso de este para obtener los productos requeridos.

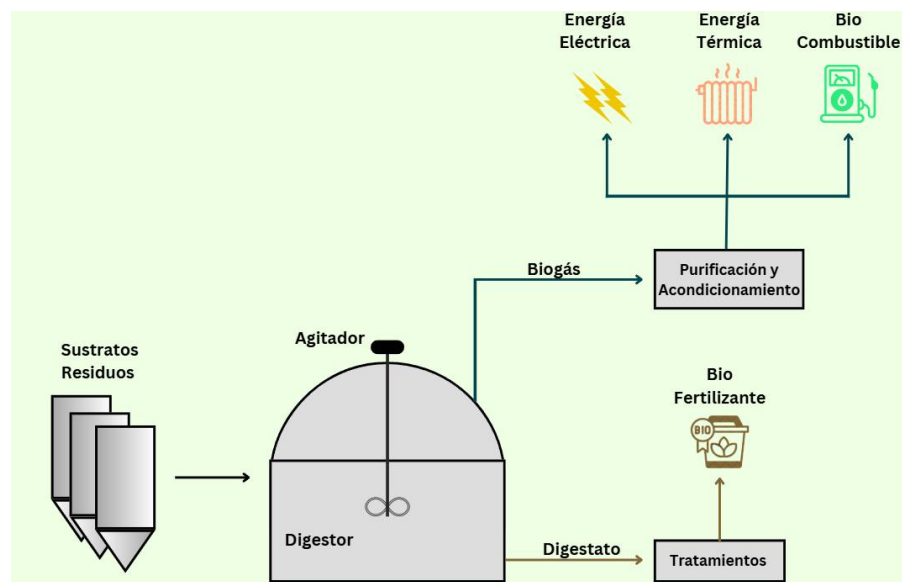


Figura 4.1: Diagrama general de plantas de biogás. Adaptado de Campos *et al.*, 2004.

El componente principal de una planta de biogás es el digestor anaerobio, equipo donde ingresan los residuos orgánicos y son tratados mediante el proceso biológico conocido como digestión anaerobia. Dado que existe una variedad inmensa de este tipo de residuos, las plantas de biogás pueden tomar diferentes configuraciones tecnológicas, donde el factor más importante es seleccionar un digestor anaerobio cuyas características sean apropiadas para el tipo de residuo, sin embargo, estas configuraciones no solo dependen de este factor para cumplir la totalidad del tratamiento, sino que también requieren de componentes como lo son los sistemas de alimentación y salida de compuestos o gases, control de parámetros, almacenamiento y acondicionamiento de biogás generado, entre otros. A continuación, se repasan los grupos más relevantes de acuerdo a lo estipulado por Bachmann en el apartado “Desing and engineering of biogas plants”, publicado el 2013 en “The Biogas Handbook”.

Almacenamiento y pretratamiento: corresponde a la sección designada a la recepción y pretratamiento del sustrato, donde se buscaría mantener lo mejor posible las condiciones del sustrato hasta su uso y entregarle las características necesarias previo al ingreso al sistema de digestión.

Sistema de digestión: esta unidad comprende el sistema de alimentación, el digester en sí, sus parámetros de operación y el sistema de agitación, donde tiene lugar la actividad de los microorganismos.

- Sistema de alimentación: encargado de llevar los sustratos desde su lugar de almacenamiento al digester. Pueden ser sistemas tanto simples como elaborados, siempre adaptándose al flujo de alimentación y sus características y al tipo de digester seleccionado.
- Digester: para poder seleccionar el tipo de digester es fundamental conocer las características del sustrato. Para el caso de residuos sólidos se recomiendan tanques de flujo pistón o reactores batch, con sistemas continuos o semicontinuos. El volumen de este equipo debe adaptarse a la cantidad del sustrato y a su tasa de degradación, por lo tanto, para garantizar el equilibrio se utilizan parámetros como la tasa de carga orgánica (TCO) y el tiempo de retención hidráulica (TRH), en el caso de flujos de alimentación continuos.
- Temperatura del reactor: como vimos en capítulos anteriores la temperatura es un factor importante para mantener y asegurar la digestión anaerobia. Respecto a esto cabe mencionar que mientras mayor sea la temperatura, más rápida es la degradación, e igualmente, mientras mayor sea la temperatura mayor será la demanda de energía de la planta de biogás. Algunas instalaciones incluso poseen digestores que se calientan por medio de la recirculación de los mismos lodos generados en el digester a través de un intercambiador de calor (Varnero, 2011).
- Número de fases: la mayoría de las plantas funcionan con un sistema de una fase, es decir, todos los pasos de la degradación ocurren en el mismo digester, e incluso de forma simultánea. Aun así, existen plantas que tienen sistemas de dos fases, lo que puede mejorar la cinética y disminuir el tiempo de retención.

Sistema de agitación: el sistema de agitación permite distribuir el sustrato de manera homogénea y uniforme a lo largo del digestor, lo que beneficia a la digestión anaerobia y permite mantener altos niveles de producción de biogás (Martínez, 2019). La agitación resulta de suma importancia cuando se trata de sustratos que poseen diferentes composiciones, lo que puede provocar la estratificación dentro del reactor, fenómeno que ralentiza o dificulta la digestión y la salida del biogás.

Según Martínez, las ventajas de contar con un sistema de agitación pueden ser: mantener un medio interno homogenizado y uniforme lo que evita concentración de espumas, costras, inhibidores y espacios muertos donde no ocurre la digestión.

Los tipos de agitación pueden ser 3 diferentes:

- Agitación mecánica: donde el aporte de energía cinética proviene específicamente de agitadores de paletas/hélices o turbinas, que mediante el giro que realizan desplazan y mezclan el sustrato. Este tipo de agitadores pueden funcionar de manera continua o intermitente y es recomendado que los valores de potencia instalada se sitúen en un rango de 5 a 8 W/m³ del digestor.
- Agitación neumática: consiste en recircular parte del biogás producido, el cual se encuentra comprimido y es inyectado al digestor por la sección inferior. Este método funciona mejor con sustratos líquidos o con bajo contenido de sólidos y pueden operar solo en modo intermitente.
- Agitación hidráulica: funciona mediante el uso de bombas que extraen y recirculan el sustrato, logrando así la mezcla dentro del digestor. Estas bombas solo funcionan de manera intermitente y las más utilizadas son de tipo centrifugas, lobulares rotatorias y de tornillo rotor único excéntrico.

Almacenamiento de biogás: lo más común es almacenar el gas producido en un gasómetro, el cual puede estar separado del sistema de digestión o en la parte superior del digestor, como una cúpula fija o variable (Varnero, 2011). En caso de que este sea separado del digestor, algunos factores a considerar son el tipo de almacenaje, el volumen y la localización (Bachmann, N, 2013).

Acondicionamiento: ya que el biogás resultante del proceso está compuesto principalmente por CH_4 y CO_2 , además de otros elementos en menor porcentaje (H_2 , N_2 , O_2 , H_2S), es necesario remover todo aquel compuesto que se considera impureza antes de ser utilizado de la manera que se requiera. Esta purificación es importante por dos razones, permite incrementar el poder calorífico del biogás y cumplir con los requerimientos de la aplicación que se le quiera dar (Varnero, 2011). El autor mencionado explica uno de los tratamientos que consiste en la eliminación de gran parte del CO_2 , vapor de agua y otros gases traza, a través de filtrado con colectores de partículas convencionales, mientras que el reformado es sólo la conversión del metano en hidrógeno. La necesidad de eliminar estos compuestos recae principalmente en que pueden provocar problemas al generar corrosión en los equipos, acumulándose e impidiendo la fluidez al utilizarse.

Si bien las plantas de biogás permiten el tratamiento de residuos orgánicos, su principal atributo es la generación de biogás, el cual tiene propiedades energéticas, por lo que es principalmente utilizado para producir electricidad. Las plantas de biogás pueden clasificarse considerando múltiples criterios, donde uno de los más relevantes, en países de América y Europa, hace referencia a 3 escalas de acuerdo a la potencia nominal que posean, por ejemplo, la escala pequeña incluye plantas con una potencia nominal de hasta 180 kW lo que sería aproximadamente 660 m³ de biogás al día. En otros países en desarrollo se habla de microescalas que permiten clasificar plantas mucho más pequeñas en términos de producción de biogás, como aquellas que pueden generar hasta 100 m³ de volumen total mediante el funcionamiento simultáneo de 5 plantas o en términos del uso que se le dará al biogás, ya sea para usos domésticos, generación de electricidad o para grandes producciones de biometano (González, 2023).

4.2 Digestores anaerobios

El núcleo de una planta de biogás es el digestor anaerobio, un reactor hermético que proporciona las condiciones adecuadas y un medio ausente de oxígeno, donde toma lugar la descomposición del residuo orgánico y, por consiguiente, la producción del biogás y digestato (Genia Bioenergy, 2024). Existe una amplia variedad de digestores anaerobios y modos de operación, sin embargo, todos pueden llevar a cabo la producción de biogás y también poseen características en común, las que fueron repasadas en el capítulo anterior.

4.2.1 Tipos de digestores

Los tipos de digestores pueden clasificarse de diferentes maneras donde una de las más comunes es hacerlo de acuerdo al flujo de alimentación o modo de operación que puede ser continuo, semicontinuo o discontinuo. En este apartado se revisarán diferentes tipos de digestores relevantes actualmente en el tratamiento de residuos orgánicos, basados en sistemas pasivos, low rate y high rate.

4.2.1.1 Sistemas pasivos

Se refiere a aquellos sistemas donde la obtención o recuperación de biogás se genera gracias a la adición de un sistema de almacenamiento o captación a un componente o sistema de tratamiento previamente existente. El digestor de sistema pasivo más común son las lagunas cubiertas para el tratamiento y almacenamiento de lodos orgánicos, sistema que permite la captación de biogás utilizando cubiertas impermeables sobre las lagunas que naturalmente no requieren alta mantención.

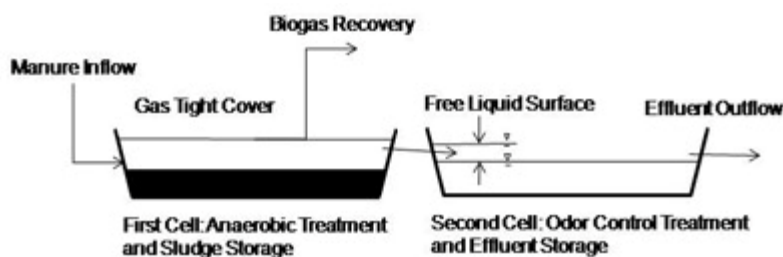


Figura 4.2: Esquema de sistema de digestión anaerobia en lagunas cubiertas

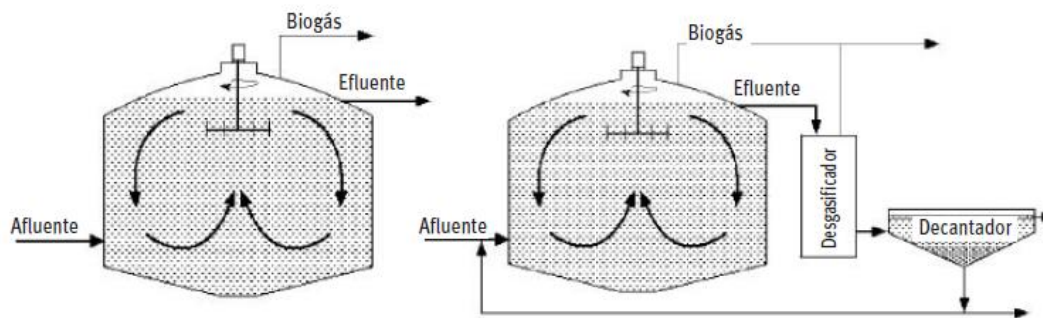
Dado que las lagunas no poseen sistemas de calefacción o enfriamiento, las temperaturas de los procesos que ocurren están directamente relacionadas a los cambios de temperatura climáticos que siguen patrones estacionales durante el año, por lo que la producción de metano disminuye considerablemente cuando la temperatura no sobrepasa los 20 °C. Por esta razón, este tipo de digestores funcionan mucho mejor ubicadas en sectores tropicales (Hamilton, 2019).

4.2.1.2 Sistemas “Low Rate”

Digestores de mezcla completa (Stirred Tank Reactor)

Digestores donde el sustrato y los microorganismos encargados de la digestión se encuentran distribuidos de manera uniforme dentro del reactor gracias a la ayuda del agitador o la reinyección a presión del biogás producido. Estos digestores normalmente se utilizan para tratar corrientes continuas de sustratos líquidos con bajos contenidos de materia sólida (de 2 a 10%) maximizan la actividad biológica (Coilkosz, 2023), son bastante simples en funcionamiento y en general tienen costos de construcción y mantenimiento bajos, sin embargo, en comparación con otros digestores, tiene tiempos de retención más altos (Martínez, 2019).

Cabe mencionar que este tipo de reactores pueden funcionar en forma continua como también discontinua. A esta última se le conoce como digestor de tanque agitado discontinuo (BSTR) que posee las mismas características que lo mencionado en el párrafo anterior, a diferencia de que, al ser discontinuo, el proceso de tratamiento del residuo orgánico ocurre en ciclos, es decir, el digestor se carga al inicio y se descarga al final sin tener ningún flujo de entrada o salida mientras el proceso ocurre en su interior. De esta manera se pueden tratar residuos orgánicos estacionales con altos contenidos de sólidos, tener mejor control del proceso y facilita la limpieza y mantenimiento del digestor.



a) Reactor de mezcla completa (RMC) sin recirculación b) RMC con recirculación (contacto anaerobio)

Figura 4.3: Esquema de reactores sin retención interior de biomasa. (Fuente: Mamani *et al.* 2021).

Digestores de flujo pistón (Plug Flow digesters)

Un digestor de flujo pistón funciona de la misma manera que uno de mezcla completa, a diferencia de que la agitación o mezcla del contenido es menor, el sustrato utilizado puede contener un mayor porcentaje de sólidos (10-15%) y están construidos siempre de manera horizontal, por lo que el sustrato ingresa por un extremo y a medida que avanza hacia la salida logra maximizar el tiempo de contacto entre el sustrato y los microorganismos. Estos digestores pueden construirse para grandes capacidades y puede ser dispuesto a distintas profundidades, de manera completa o parcial (Martínez, 2019).

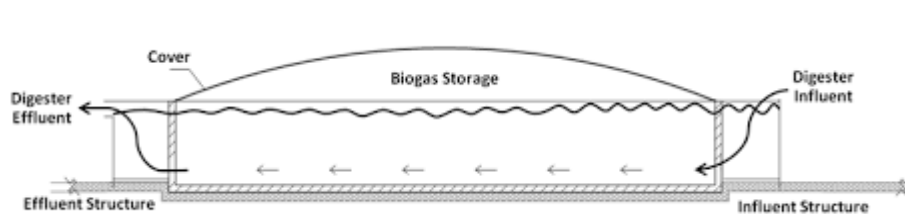


Figura 4.4: Diagrama de digestor de flujo pistón. (Fuente: Bentley, Johanna. 2012).

4.2.1.3 Sistemas “High Rate”

Digestores de lecho fijo (Fixed film digesters)

Este tipo de digestores contienen en su interior una columna o lecho de materiales como chips de madera o pequeños plásticos donde crecen y se fijan los microorganismos generando una biopelícula. El sustrato ingresa al digestor y fluye a través de este medio fijo, por lo tanto, suelen lidiar perfectamente con sustratos con muy poca cantidad de sólidos (1-5%), tienen alta retención de biomasa y requieren de un sistema externo que filtre previamente las grandes partículas de sólidos del residuo (Hamilton, 2019).

Dado que el principal componente de este tipo de digestores es el lecho, hay que tener extremo cuidado con este ya que al “filtrar” de cierta forma el sustrato ingresado, tiende a obstruirse o incluso a acumular aglomeraciones de microorganismos que pueden terminar eliminados, por lo que es de suma importancia realizar limpiezas constantes para mantener la eficiencia del proceso (Martínez, 2019).

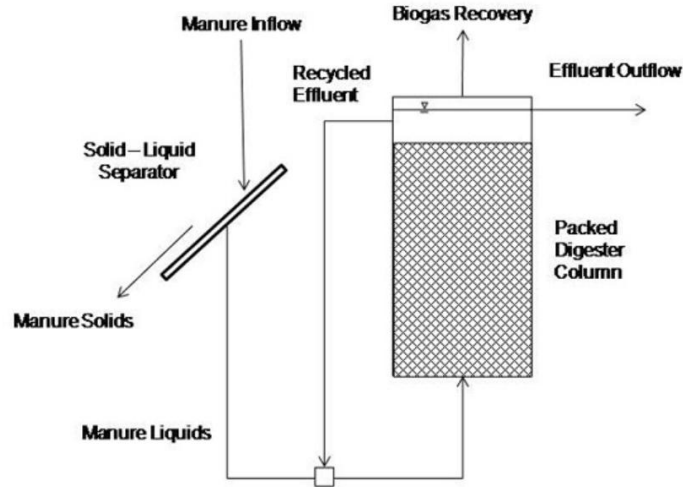


Figura 4.5: Esquema de un sistema de lecho fijo para el tratamiento de estiércol animal. (Fuente: Bentley, Johanna. 2012).

Digestores de medio suspendido

Este tipo de reactores poseen a los microorganismos suspendidos libremente a lo largo del digestor, por el que el sustrato va a fluir de manera ascendente. El flujo de alimentación puede ser ajustado para mantener en el digestor sólo partículas de gran tamaño, lo que permite que los microorganismos formen biopelículas alrededor de estas. Este tipo de digestores puede que requieran sistemas para retener la biomasa en su interior y se desempeñan perfectamente con cargas de alta materia orgánica que mantengan un porcentaje de sólidos totales entre 3 y 12% (Hamilton, 2019), sin embargo, funcionan mejor con menores porcentajes por lo que se usan ampliamente para el tratamiento de aguas residuales y caudales continuos.

Existen diferentes diseños relacionados a este tipo de digestores, como lo es el caso del digestor anaerobio de lecho fluidizado (AFBR) que cuenta con un medio artificial, donde las biopelículas se forman y adhieren a partículas interés, como arena o carbón activado, que se encuentran suspendidas y son mantenidas en estado fluidizado por la fuerza y velocidad del flujo ascendente del sustrato que ingresa al digestor. (Khan *et al.*, 2023). Este tipo de digestores presenta una gran eficiencia gracias al constante movimiento de las partículas y poseen una alta retención de biomasa.

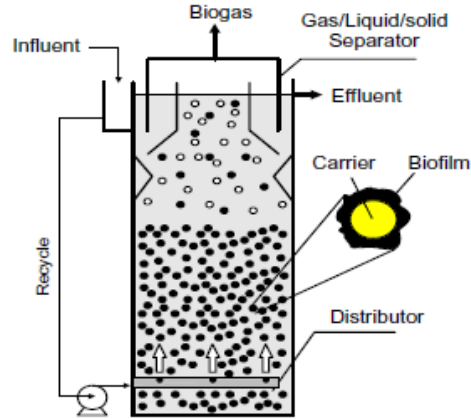


Figura 4.6: Esquema de un sistema de AFBR. (Fuente: Service and R&D of innovative water technology. 2018).

Otro de los tipos más conocidos es el digestor anaerobio de flujo ascendente con lecho de lodos (UASB), el cual posee una manta de lodos formada por la sedimentación de gránulos o flóculos de biopelículas, la cual va a tratar al sustrato en el momento en que este le atraviesa durante su flujo ascendente. Posee velocidades de flujo menores en comparación al AFBR no obstante requiere de menos energía para funcionar.

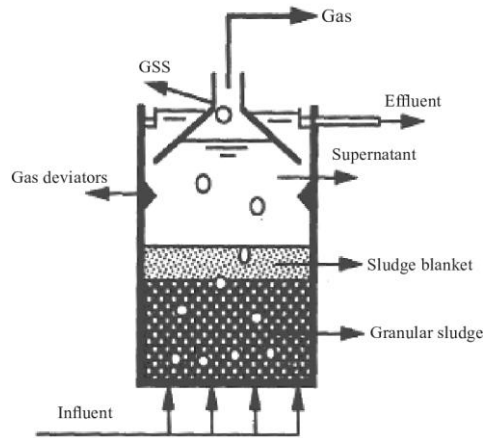


Figura 4.7: Esquema de un sistema de UASB. (Fuente: Ali, Arshad. 2012).

Digestores por lotes (Batch)

Aquellos digestores que se denominan “Batch” se caracterizan por ser alimentados discontinuamente, es decir, realizan todo el proceso completo con cada carga de alimentación y una vez se haya finalizado la producción de biogás, se puede empezar con otro lote o ciclo, por lo que se utilizan principalmente para tratar residuos que se generan con intermitencia, como lo es el caso de los residuos de cosechas (Varnero, 2011).

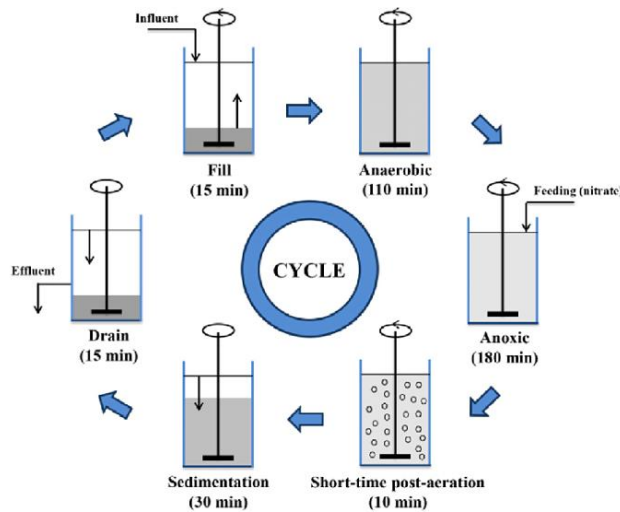


Figura 4.8: Secuencia de operación de un reactor Batch. (Fuente: Dai, Hongliang. 2017).

Por otro lado, también existen digestores que funcionan específicamente bajo condiciones discontinuas, como es el caso del digestor anaerobio por lotes secuenciales (ASBR) que opera en ciclos de 4 fases: alimentación, reacción, sedimentación y descarga. La primera fase contempla el ingreso del sustrato al reactor, el cual se va a mezclar constantemente. Durante la fase de reacción ocurre la degradación de la materia orgánica y la generación de biogás. Una vez finaliza la fase de la reacción, continua la fase de sedimentación, donde se detiene la agitación de la mezcla y comienza la separación de las fases sólido-líquido, para finalmente pasar a la última fase, en donde se descarga todo el material.

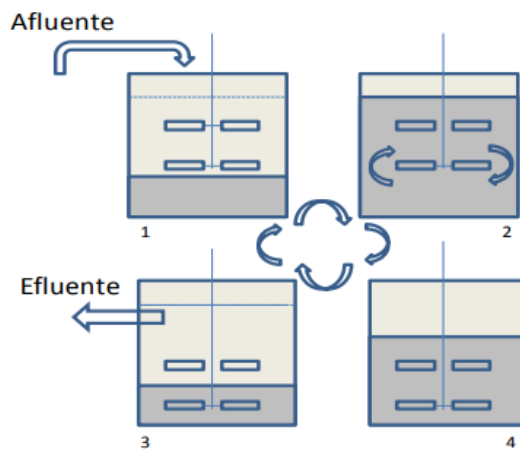


Figura 4.9: Etapas de operación de un reactor ASBR (1) alimentación, (2) reacción, (3) sedimentación (4) descarga. (Fuente: Rosenkranz, Francisca. 2013).

Este tipo de reactores se utilizan principalmente para el tratamiento de aguas residuales ya que presenta múltiples beneficios en comparación a otras tecnologías, presentan altas concentraciones de biomasa, mejor control sobre la calidad del efluente y altas generaciones de biogás. Por otro lado, este tipo de reactores presenta diferentes factores que pueden influir en su funcionamiento, como lo es la geometría del reactor, el tipo de alimentación y las concentraciones de sustrato y biomasa (Kannan & Singaram, 2012).

4.2.2 Condiciones ambientales y de operación

Para que el proceso y sus diferentes etapas ocurran de manera óptima, es decir, maximizando la obtención de biogás, las relaciones de producción CH_4/CO_2 , y los otros beneficios mencionados, se deben considerar ciertos factores, tanto ambientales como operacionales.

Composición del sustrato

Existe una gran variedad de materias primas que pueden ser alimentadas a los biodigestores, por lo que es importante conocer la composición bioquímica y la naturaleza de estas para poder asegurar el funcionamiento del proceso microbiológico (Varnero, 2011).

En el mismo documento citado en el párrafo anterior, se menciona que otro factor importante relacionado a las materias primas utilizadas como sustrato, es la relación carbono/nitrógeno que poseen, principalmente porque estos nutrientes constituyen la fuente de energía y formación para nuevas células, es decir, son la fuente de alimentación de las bacterias, por lo que deben estar por encima de la concentración óptima para el desarrollo de estas.

Temperatura

El proceso anaerobio es dependiente en su totalidad de la temperatura, es decir, la velocidad de reacción del proceso y la velocidad de crecimiento de los microorganismos requiere cierta temperatura para poder llevarse a cabo (Varnero, 2011). Por esta razón se debe contar con un sistema de agitación y control de temperatura, asegurando así la mantención de los rangos de temperatura necesarios para el crecimiento de los microorganismos, los cuales se pueden observar en la siguiente tabla:

Tabla 4.1: Rangos de temperatura y tiempo de fermentación anaerobia. (Fuente: Lagrange, 1979.)

Fermentación	Mínimo	Óptimo	Máximo	Tiempo de fermentación
Psycrophilica	4 – 10 °C	15 – 18 °C	10 – 25 °C	Sobre 100 días
Mesophilica	15 – 20 °C	25 – 35 °C	35 – 45 °C	30 - 60 días
Termophilica	25 – 45 °C	50 – 60 °C	75 – 80 °C	10 – 15 días

Agitación

Para garantizar que la temperatura se mantenga homogénea en todo el biodigestor y para uniformar la densidad bacteriana, evitar la formación de costras, espumas y sedimentos, se utilizan diferentes mecanismos de agitación, los cuales pueden ser de forma mecánica, neumática o hidráulica.

pH

La actividad de las bacterias metanogénicas es altamente dependiente del pH, por lo que este parámetro debe mantenerse en un rango entre 6 y 8, siendo el pH 7 o neutro el más ideal. Debido a la presencia de compuestos que generan efectos buffer (como el CO₂ y el NH₄), el proceso en sí mismo tiene capacidad para regular el pH de la biomasa que se introduce al biodigestor (Bennardi, 2021).

Alcalinidad

Fuertemente relacionada con el pH, esta variable permite determinar la capacidad del medio para poder neutralizar la generación de ácidos manteniendo el pH estable (Martínez, 2019). Para evitar la acidificación se recomienda una alcalinidad superior a 1,5 g/l CaCO₃ (IDAE, 2007).

Potencial redox

Potencial de reducción-oxidación entrega la información sobre si se favorecerán las reacciones químicas reductoras u oxidantes, lo que puede beneficiar o no a los microorganismos metanogénicos (Martínez, 2019). Para asegurar el crecimiento estos microorganismos es recomendable mantener valores inferiores a -350 milivoltios (mV) (IDAE, 2007), y en aquellos sustratos en los que el potencial redox no sea lo suficientemente bajo, se pueden utilizar compuestos reductores para acondicionamiento.

Micronutrientes e inhibidores

La presencia de metales pesados, antibióticos, desinfectantes, insecticidas, detergentes, concentraciones elevadas de ácidos carboxílicos o de amoníaco, son algunos de los compuestos que pueden inhibir la digestión anaerobia (Bennardi, 2021).

Tiempos de retención

Se refiere al tiempo que debe permanecer la biomasa dentro del digestor para completar su degradación. Estos tiempos van a depender de la composición de la biomasa y de las temperaturas que se mantengan dentro de los biodigestores.

4.3 Digestión anaerobia

La digestión anaerobia es un proceso que ocurre en ausencia de oxígeno, en el cual la materia orgánica se descompone con la ayuda de bacterias con características específicas, generando dos productos; una mezcla de gases conocida como biogás y una mezcla semilíquida de compuestos químicos de compleja degradación, llamada digestato o digerido (Campos *et.al.*, 2004).

4.3.1 Etapas de la digestión anaerobia

Este proceso ocurre en 4 etapas, las que se desarrollan de manera consecutiva y simultánea, a lo largo del tiempo. Cada etapa requiere de diferentes tipos de microorganismos y presenta diferentes velocidades de reacción, lo que dependerá del sustrato (o alimento) suministrado y de que el desarrollo del proceso global mantenga su equilibrio y estabilidad, para evitar la acumulación de inhibidores o de ácidos grasos volátiles (IDAE, 2007). En la figura 4.10 se observa un esquema de las etapas del proceso.

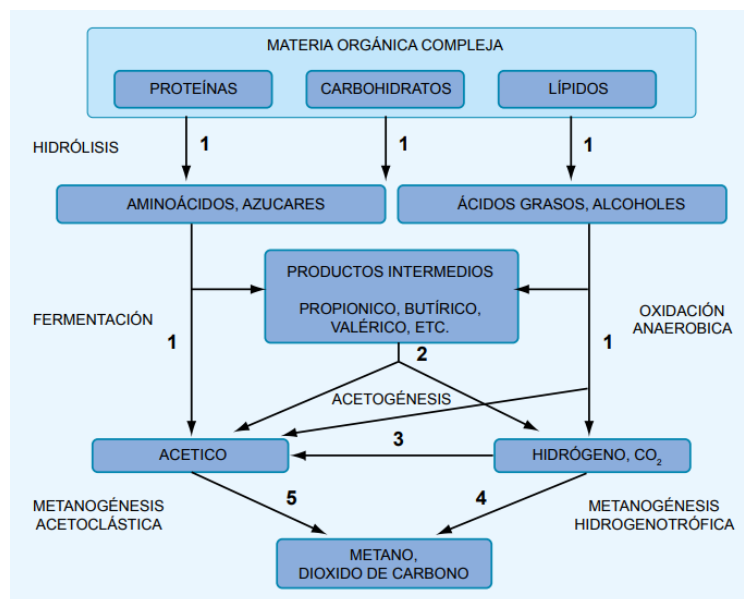


Figura 4.10: Esquema de reacciones de la digestión anaeróbica de materiales poliméricos.
(Fuente: Pavlostathis y Giraldo-Gómez, 1991).

Hidrólisis

La etapa inicial de la digestión anaerobia ocurre en presencia de H₂O, donde la biomasa, que está conformada por diferentes polímeros y macromoléculas orgánicas (carbohidratos, lípidos, proteínas), es hidrolizada por la acción de las enzimas secretadas por los microorganismos hidrolíticos presentes, produciendo así monómeros de menor peso molecular de fácil asimilabilidad para las bacterias anaerobias de las siguientes etapas (Bennardi, 2021).

La velocidad de esta etapa depende principalmente del tamaño superficial de las partículas de la biomasa, el contenido de sólidos y del porcentaje de materiales con lignina, celulosa o hemicelulosa.

Acidogénesis (fermentación)

La segunda etapa consiste en la degradación de azúcares y aminoácidos, mediante la asimilación de moléculas orgánicas solubles por las bacterias acidogénicas. Por lo tanto, se obtienen diferentes ácidos como el acético, butanoico y propanoico y otros subproductos como H₂ y CO₂, que podrán ser utilizados en la etapa metanogénica, y etanol y ácido láctico, que serán oxidados por las bacterias acetogénicas (Martínez, 2019).

Acetogénesis

Durante la tercera etapa, las bacterias acetogénicas convierten los ácidos de las etapas anteriores en ácidos acéticos y mezclas de H₂ y CO₂. Además, actúan otras bacterias homoacetogénicas que forman ácido acético como resultado de su metabolismo y consumen H₂, lo que ayuda a disminuir la presión parcial del H₂, manteniendo la actividad de las bacterias acetogénicas y acidogénicas (Martínez, 2019).

Metanogénesis

En la cuarta y final etapa, los microorganismos presentes son únicamente anaerobios y producen CH₄, a partir del ácido acético, el H₂ y el CO₂ que fueron generados en las etapas anteriores (Bennardi, 2021). Esta transformación se logra a través de dos reacciones:

Vía acetoclástica: o también acetotrófica, donde el ácido acético se transforma en CH₄ y CO₂



Vía hidrogenotrófica: donde el H₂ y el CO₂ se transforman en CH₄ y H₂O



4.3.2 Biogás

Como fue explicado en apartados anteriores, el biogás es uno de los productos resultantes del proceso de la digestión anaerobia. Es una combinación de los siguientes compuestos; CH₄, CO₂, N₂, H₂, O₂, H₂S, NH₃ y vapor de agua, los que pueden encontrarse en diferentes porcentajes, dependiendo de las características de la materia orgánica utilizada (ver Tabla 4.2). Si bien la proporción de estos compuestos depende del material tratado, las cantidades de CH₄ y CO₂ son siempre las dominantes, abarcando aproximadamente entre el 50-80% y el 20-50% respectivamente (Martínez, 2019).

Tabla 4.2: Composición de biogás dependiendo del sustrato utilizado. (Fuente: MINENERGÍA, 2012).

Componente	Residuos Agrícolas y Ganaderos	Residuos Industriales	Vertederos de RSU
CH ₄	50-80%	50-70%	45-65%
CO ₂	30-50%	30-50%	34-55%
N ₂	0-1%	0-1%	0-20%
O ₂	0-1%	0-1%	0-5%
H ₂	0-2%	0-2%	0-1%
CO	0-1%	0-1%	Trazas %
H ₂ S	100-7.000 ppm	0-8%	0.5-100 ppm %
NH ₃	Trazas	Trazas	Trazas
Vapor de Agua	Saturación	Saturación	Saturación
Orgánicos	Trazas	Trazas	Trazas

Debido a estas características es que el biogás presenta un potencial de generación de energía, lo que le convierte en un tipo de biocombustible o recurso energético renovable y no convencional.

4.3.2.1 Usos del biogás

El biogás como tal tiene diferentes aplicaciones, sin embargo, la composición de este y la necesidad de remoción de algunos compuestos, dependerá del uso que se le quiera dar. Algunos de los usos comunes según lo indicado en el Manual de Biogás del Ministerio de Energía (MINENERGIA) se presentan a continuación:

- Generación térmica: a través de su combustión en calderas, puede proporcionar energía calórica para actividades básicas como cocinar, calentar agua y calefacción.
- Generación eléctrica y combinada: mediante combinaciones entre motores de combustión (adaptados al biogás) y un alternador o también con turbinas de gases, se utilizan para la producción de calor y energía, lo que aumenta la eficiencia al combinar la generación de ambos (Varnero, 2011).
- Combustible sustituto: el biogás puede ser utilizado para sustituir combustibles, por ejemplo, gas natural para vehículos, donde es necesario purificarlo para que obtenga una calidad que se asimile al gas natural. También puede ser utilizado en motores de combustión interna, tanto a gasolina como Diesel.
- Pilas/Celdas de combustible: a través de un dispositivo electroquímico que convierte energía química en energía eléctrica en forma directa, alternativa que surge como una opción innovadora, que se lleva a cabo con una serie de fases continuas.

El biogás crudo resultante del proceso debe pasar por múltiples tratamientos antes de ser utilizado, los que dependerán concretamente de la composición del biogás y el uso que se le vaya a asignar, por lo que algunos procesos son más exhaustivos y completos que otros, sin embargo, hay procesos de aplicabilidad general, como lo es el caso de la limpieza o eliminación de H₂O, SO₂ y CO₂ (Ávila *et al.*, 2018.)

4.3.3 Digestato

El segundo subproducto de la digestión anaerobia es el digestato, una mezcla que puede obtenerse en distintos estados (líquido o sólido-líquido) dependiendo del digestor del que provenga, se compone por una combinación de nutrientes (N, P, K, etc.), compuestos de compleja degradación e incluso puede contener microorganismos que se vieron involucrados en el proceso, propiedades que lo convierten en un potencial biofertilizante, que dependería principalmente del contenido de materia orgánica y nutrientes.

Las cantidades que se producen son similares a los volúmenes insertados como biomasa a los reactores y puede aplicarse en la agricultura como fertilizante, entregando beneficios como un aporte de nutrientes a los cultivos y la mejora de los suelos en los que se utilizan. No obstante, este producto también puede ser utilizado de otras maneras, como material absorbente para el tratamiento de emisiones gaseosas y líquidas o para la restauración de taludes (Martínez, 2019).

El digestato debe ser almacenado una vez es obtenido, por lo que se deben considerar diferentes alternativas. Para esto existen instalaciones como balsas o tanques, que son impermeables y cuentan con sistemas que recolectan los lixiviados y recuperan el biogás remanente que puede llegar a generarse al principio del almacenamiento.

Para poder utilizar este producto, primero debe ser sometido a tratamientos, con el objetivo de mejorar sus propiedades y generar las condiciones apropiadas y necesarias para la aplicación que se busque. El digerido puede utilizarse de dos maneras, con una aplicación directa o a través de separación de fases.

- Aplicación directa: consta de hacer un tratamiento básico para que el digerido obtenga algunas características mínimas de calidad fertilizante, como lo es que sea un producto higienizado y biológicamente estable, es decir, que tenga concentraciones de nutrientes adecuadas y que contenga la cantidad más mínima posible de compuestos contaminantes o impurezas, como metales pesados y alguno compuestos tóxicos para la salud humana.
- Separación de fases: es un tratamiento físico donde el digerido se divide en dos fracciones, una sólida y otra líquida, con la finalidad de facilitar el manejo de ambas fases. La fase sólida presenta un mayor porcentaje de fósforo, potasio y nitrógeno orgánico, mientras que en la fase líquida predomina el nitrógeno inorgánico, y ambas

pueden ser gestionadas como residuos en sí, por ejemplo, la fase sólida puede tratarse por medio del compostaje o trabajarse para obtener un pelletizado, mientras que la fase líquida puede tener aplicaciones directas en el suelo o valorizarse separadamente, logrando la recuperación o eliminación de nutrientes.

El digestato obtenido presenta propiedades fertilizantes ya que durante la digestión el contenido de nutrientes (NPK) que posee el sustrato se mantiene estable y no se producen pérdidas del contenido, por ejemplo, de nitrógeno (Valoralgae, 2021). Por esto el digestato usualmente es tratado al final del proceso, separando sus distintas fases y se les da un uso directo de aplicación como fertilizante de suelos o incluso recirculando la fase líquida al digestor.

4.4 Ensayo de Potencial Bioquímico de Metano

El ensayo de Potencial Bioquímico de Metano (PBM) es una prueba que permite evaluar el potencial de biodegradación anaerobia de un sustrato orgánico, es decir, es un método para determinar el posible rendimiento de generación de metano de un sustrato bajo condiciones establecidas (Raposo *et al.*, 2012).

Esta prueba permite determinar la máxima cantidad de metano producida por gramo de biomasa y la cinética de producción, bajo condiciones controladas de laboratorio, en reactores por lote (Leusteur *et al.*, 2010). Se calcula como la máxima cantidad de metano acumulada en el periodo ensayado, dividida por cantidad de masa de sustrato agregada, expresado comúnmente como ml de CH₄/g DQO o g SV (Bres *et al.*, 2022).

La primera propuesta metodológica para la realización de este ensayo fue postulada por Owen *et al.* en 1979 para determinar la biodegradabilidad de materiales orgánicos bajo condiciones operacionales definidas durante 30 días, donde se analizó el efecto del acondicionamiento alcalino del sustrato sobre el valor del PBM (Cardenas *et al.*, 2016). Los mismos autores mencionan que, al ser descrito y afirmado como un ensayo relativamente simple, ya que no requiere de instrumentos avanzados y puede ser desarrollado en cualquier laboratorio, se han realizado muchos estudios desde ese entonces a lo largo del mundo, cuya variedad comprende diferentes variables y consideraciones. Por lo tanto, en la actualidad existe una alta variabilidad entre todas las propuestas, lo que dificulta una estandarización de aplicación del método y la comparación de resultados.

A pesar de la gran variedad de estudios, existen algunas publicaciones que buscan la estandarización del ensayo, estableciendo parámetros o condiciones que siempre deben considerarse. Holliger y colaboradores presentaron el año 2016 un estudio llamado “Towards a Standardization of Biomethane Potential Tests” donde abordan y describen los diferentes aspectos a considerar que fuertemente influyen en el desarrollo y resultados del PBM, como el inóculo, el sustrato, la preparación de las muestras y del ensayo, con tal de incrementar la probabilidad de obtener resultados válidos y reproducibles.

En lo que respecta a residuos sólidos orgánicos utilizados como sustrato, Angelidaki y colaboradores publicaron un estudio el 2009 donde se propuso un protocolo para ensayos batch al momento de definir el PBM en estos residuos, abordando consideraciones como el tamaño las partículas, la actividad del inóculo, la utilización de un medio de nutrientes, con tal de establecer el primer paso para definir un protocolo estándar.

El ensayo consiste en incubar una cantidad de sustrato con un inóculo y medir el volumen de biogás que se genera con el tiempo. En general, existen diferentes consideraciones para tener en cuenta, tanto previo al ensayo como durante. Algunos factores y condiciones que pueden afectar el ensayo se presentan a continuación:

4.4.1.1 Sustrato

La productividad metanogénica dependerá directamente de la naturaleza del residuo o sustrato utilizado (Tabatabaei & Ghanavati, 2018), por lo que realizar una caracterización de este se vuelve fundamental. Según lo estipulado en el documento llamado “Ensayo potencial bioquímico metanogénico: Una metodología clave para conocer la energía de las biomásas”, publicado por Bres *et al.*, (2022), algunos de los factores más importantes para determinar serían:

- Composición y tamaño: sus contenidos de lignina, celulosa y hemicelulosa son importantes ya que pueden ser de baja biodegradabilidad anaeróbica y tienen menor aporte al potencial metanogénico del residuo. Por otro lado, el tamaño de partícula de la muestra es igualmente importante ya que puede ser limitante para algunas fases de la digestión anaerobia, por lo que es recomendable que no supere los 10 mm de superficie.

- Sólidos Volátiles (SV): el contenido de materia orgánica del sustrato puede expresarse técnicamente por este parámetro. La producción de metano se incrementa cuanto mayor es el contenido de SV.
- Relación Carbono-Nitrógeno: Variable importante que puede afectar el desarrollo de las bacterias metanogénicas. Una baja relación C/N puede causar la inhibición en las bacterias metanogénicas y una relación demasiado alta podría limitar el crecimiento de estas. Se estima que el rango óptimo de la relación se encuentra entre 20 y 30 (Tabatabaei & Ghanavati, 2018), mientras que Deublein & Steinhauser (2008) establecen que para una buena degradabilidad el rango debe estar entre 16 y 25.

Esto es solo una indicación, ya que el nitrógeno también puede unirse en las estructuras de lignina. La necesidad de nutrientes es muy baja debido al hecho de que con el proceso anaeróbico no se desarrolla mucha biomasa, por lo que para la formación de metano incluso una proporción de nutrientes C: N: P: S de 500 - 1000: 15 - 20: 5: 3 y/o una relación de materia orgánica de DQO: N: P: S = 800: 5: 1: 0.5 es suficiente. (Deublein & Steinhauser, 2008)

- Disponibilidad de nutrientes: se debe conocer si el sustrato contiene las cantidades necesarias de elementos o nutrientes para el desarrollo de las bacterias. Algunos de estos nutrientes son el nitrógeno, fósforo y azufre.
- Sólidos Totales (ST): se estima que una concentración de sustrato entre el 2 y el 10% de sólidos totales en el reactor es adecuada para asegurar la transferencia de masa (Raposo *et al.*, 2012). La concentración del sustrato debe mantenerse alta y evitarse la dilución, aproximadamente en 10 gSV/L, bajas concentraciones pueden alterar la actividad metabólica de los microorganismos y altas concentraciones pueden conducir a una inhibición en el proceso.

4.4.1.2 Inóculo

Es una sustancia que contiene una variedad de microorganismos que será los principales consumidores del sustrato. Es recomendable que el inóculo esté caracterizado y tenga sus propiedades conocidas, ya que factores como; el origen, la concentración (en g de SV/L), el nivel de actividad, los tiempos y temperaturas durante el almacenamiento e incubación previa

al inicio de la prueba, pueden alterar el rendimiento de la biodegradación del sustrato (Raposo, 2011). Uno de los factores más importantes a definir es la cantidad de sólidos volátiles, que se utiliza como una medida del contenido de microorganismos en el inóculo (Angelidaki *et al.*, 2009). La misma autora junto a Sanders el 2004, postularon que una pequeña cantidad de inóculo puede conducir a una sobrecarga en el proceso, mediante la acidificación que genera la inhibición de la producción de metano.

Previo a la utilización del inóculo, es necesaria la desgasificación de este, para eliminar la materia orgánica degradable residual que pueda existir (Angelidaki *et al.*, 2009). Según la autora, el inóculo debe incubarse por aproximadamente 5 días, hasta que no presente una producción de metano significativa y además se debe mantener bajo las mismas condiciones de temperatura que las del proceso anaerobio desde donde el inóculo fue originado.

Los autores mencionados en los párrafos anteriores establecen que los inóculos más utilizados son lodos anaeróbicos provenientes de plantas de tratamiento, por ejemplo, de aguas residuales, de residuos agroindustriales y de estiércoles. Lo más recomendado, según lo postulado por Holliger *et al.*, (2016), es que el inóculo provenga de un digester en funcionamiento que digiera materias orgánicas complejas y que se encuentre bajo un estado estable. El mismo autor sugiere que es de suma importancia determinar el pH, los ácidos grasos volátiles, cantidades de amonio y su alcalinidad.

Por otro lado, la importancia de la relación sustrato inóculo (S/I), es decir, el balance que existe entre el sustrato y los microorganismos, es que asegura la eficiencia de la biodegradabilidad (Bres *et al.*, 2022). Las autoras postulan que si la carga de sustrato se encuentra demasiado baja se puede reflejar baja producción de biogás, mientras que si es demasiado alta podría resultar en una inhibición de la producción de biogás. Se estima que una relación S/I entre 0,25 y 1 (g SV/ g SV) es recomendable, siempre manteniendo la cantidad de inóculo por sobre la del sustrato (Holliger *et al.*, 2016).

Ya que esta relación depende completamente del tipo de sustrato que se esté utilizando, se convierte en una de las variables claves para definir o experimentar en los ensayos PBM, para así encontrar la mejor relación que se adecue a las características del sustrato.

4.4.1.3 Parámetros y factores de operación

Según Raposo (2011), las condiciones operacionales pueden dividirse en físicas y químicas, las que al verse alteradas o fuera de los rangos establecidos podrían generar efectos inhibitorios.

Física

En este grupo entran las consideraciones que deben tenerse respecto al reactor a utilizar en el ensayo, como el volumen de este, el tipo de agitación de la muestra, los tiempos previos a la incubación y duración del ensayo, el sistema de temperatura y en que rango se encontrará (35 °C Mesofílico o 55°C Termofílico).

Químicas

Otros factores por considerar son el volumen del “headspace” o cámara de gas del reactor, el ajuste de la relación pH/alcalinidad y la utilización de un medio mineral que entregue los nutrientes necesarios (N, P, S) en concentraciones balanceadas.

Es importante igualmente considerar la inclusión de un blanco y un control en el desarrollo del ensayo. El blanco consiste en incubar el inóculo seleccionado por sí solo, mientras que el control es incubar el inóculo con un sustrato ya estandarizado, cuyos valores de rendimiento teórico sean conocidos (Bres et al., 2022). Según lo publicado por Angelidaki et al. (2009), el blanco será utilizado para identificar la materia orgánica residual que pueda contener el inóculo, lo que se debe considerar una vez finalizado el ensayo y el control, que pueden ser los más comunes como la celulosa y la gelatina, permitirá validar el procedimiento de medición del gas.

4.4.1.4 Métodos de medición de biogás

Existen diferentes metodologías e instrumentos para la medición de biogás generado durante este ensayo reportados por la bibliografía, los cuales se describen a continuación.

Método manométrico

Basado en la medición de la presión ejercida por el volumen del biogás generado y acumulado en el espacio libre del reactor, al cual se le conoce como “headspace” (Bres *et al.*, 2022).

Método volumétrico por desplazamiento

Basado en la medición del desplazamiento de una solución contenida en un sistema externo al reactor donde se acumula el biogás generado, es decir, el biogás generado atraviesa esta solución y el volumen desplazado corresponde al volumen de biogás generado (Bres *et al.*, 2022)

Método volumétrico por jeringa

Basado en utilizar la aguja de una jeringa invertida, la cual se inserta por la superficie superior del reactor y cuando el biogás se genere va a ejercer una presión que desplazará el émbolo de la jeringa, logrando así un equilibrio de presiones. La medida del desplazamiento del émbolo de la jeringa corresponde a volumen de gas generado (Bres *et al.*, 2022).

Método por caudalímetro

Se basa en la utilización de un equipo tecnológico el cual se instala a través de la superficie superior del reactor y capaz de medir con grandes presiones el volumen de biogás que se genera. Esta tecnología puede entregar informaciones útiles como caudales de flujo, mediciones continuas e igualmente liberar el gas generado para evitar la sobrepresión en el headspace.

Cromatografía de gases

Método que consiste en extraer con una jeringa el biogás generado en el reactor para introducirlo al instrumento conocido como cromatógrafo de gases, lo que permite obtener información más específica respecto al contenido del biogás en su totalidad. (Bolaños & Sandoval, 2022).

4.4.1.5 Frecuencias de muestreo y duración del ensayo

En lo que respecta a la frecuencia del muestreo, existen diferentes recomendaciones dependiendo del tipo de sistema de medición a utilizar, como, por ejemplo, lo que postula Holliger *et al.*, (2016) es que, si se utiliza el método manométrico, la frecuencia de medición dependerá completamente de la presión que se genere por el biogás en el headspace. Bress y colaboradoras (2022), recomiendan realizar mediciones diarias por una semana e ir reduciendo la frecuencia de mediciones a dos o una vez por semana.

El tiempo de incubación o duración del ensayo no se puede fijar ya que depende específicamente del sustrato e inóculo utilizados, sin embargo, se estima que aproximadamente puede durar entre 1 o 2 meses (Bress *et al.*, 2022). Se recomienda que el ensayo finalice una vez la producción de metano diaria durante tres días consecutivos sea menor al 1% del volumen total de metano acumulado (Holliger *et al.*, 2016).

5. Materiales y Métodos

El desarrollo del presente trabajo de Seminario de Título se llevará a cabo mediante la realización de diferentes actividades asociadas a cada uno de los objetivos específicos como se detalla a continuación.

5.1 Caracterización de los residuos orgánicos generados en la Viña Errázuriz durante la temporada de vendimia

5.1.1 Cuantificación de los residuos orgánicos

Para este trabajo se consideraron los residuos sólidos orgánicos más significativos generados en el proceso de producción del vino en la Viña Errázuriz, aquellos que la misma viña almacena, externaliza y declara en el SINADER.

Una vez iniciada la temporada de vendimia, la generación de estos residuos es de manera paralela al proceso de fermentación, es decir, durante la temporada tienen ingresos de uvas a las cubas para iniciar la fermentación como también existen los retiros en las cubas de la uva ya fermentada, donde se separa al mosto del orujo, por lo tanto, ocurre de forma simultánea durante los meses que dura la temporada.

Fue necesario identificar los flujos de entrada y salida de uva, por lo que se tuvo que acceder a la información de la viña y se identificaron los meses de ingreso (duración de vendimia), las cantidades de ingresos de uva, las cantidades de residuos orgánicos generados y los tiempos asociados a estos factores, es decir, cuanto se genera cada mes, y así se estimaron y calcularon las generaciones por temporada y anuales.

5.1.2 Caracterización del residuo orgánico

Dado que el residuo no es generado durante todo el año, es decir, sólo durante la época de vendimia, se organizó el retiro de este de tal manera que coincidiera con la última tanda generada. Así, se retiraron aproximadamente 10 kilos de residuo orgánico, donde cierta cantidad (1,5 kg aprox.) se llevó a la estufa para secarse y ser utilizada en el futuro mientras que el resto se congeló o utilizó para realizar la caracterización, ajustes de pH y otras pruebas.

Como ya fue explicado en capítulos anteriores, uno de los parámetros más importantes a considerar para la realización del PBM es la caracterización del sustrato, la cual requiere la identificación y determinación de múltiples factores, sin embargo, en este trabajo solo se abarcaron sólidos totales, sólidos volátiles, humedad, pH y composición fisicoquímica del material del residuo. A continuación, se repasa la metodología utilizada para realizar la caracterización.

5.1.2.1 Determinación de sólidos totales

El desarrollo de la prueba se realizó considerando lo establecido en el documento “Standard Methods for the Examination of Water and Waster. APHA.2012”.

Materiales: 6 Crisoles de 30 ml, balanza de precisión analítica, pinzas metálicas tipo tijeras y pequeñas, bandeja, estufa a 105°C, trituradora y desecadora.

Procedimiento: inicialmente se ubicaron los 6 crisoles en la estufa por 1 hora a 105°C. Por mientras, se llevó un puñado de residuo orgánico a la trituradora. Una vez pasada la hora, se retiraron los crisoles y se dejaron enfriar hasta temperatura ambiente en la desecadora. Una vez listos, se retiraron de la desecadora y se registró su peso en la balanza analítica (pcs).

Una vez registrados los pesos, se llenó cada uno de los crisoles con el residuo orgánico triturado hasta $\frac{3}{4}$ de capacidad y se registró el peso nuevamente (pmh). Con todos los crisoles con residuo pesados, se dejaron en la bandeja y se ingresaron a la estufa por aproximadamente 24 horas.

Pasadas las 24 horas, se retiró la bandeja con los crisoles y se dispusieron en la desecadora para que alcanzaran temperatura ambiente, luego, todos los crisoles con muestra seca se llevaron a la balanza analítica para registrar el peso de cada uno (pms).

Para determinar los sólidos totales se utilizó la siguiente ecuación:

$$ST \left(\frac{g}{g} \right) = \frac{pms - pcs}{pmh - pcs}$$

(Ecuación 5.1)

Donde,

ST: sólidos totales. (g/g)

pcs: peso del crisol seco. (g)

pmh: peso de la muestra húmeda incluyendo el peso del crisol. (g)

pms: peso de la muestra seca incluyendo el peso del crisol (g)

5.1.2.2 Determinación de sólidos volátiles

El desarrollo de la prueba se realizó considerando lo establecido en el documento “Standard Methods for the Examination of Water and Waster. APHA.2012”.

Materiales: 6 Crisoles de 30 ml cada uno, balanza de precisión analítica, pinzas metálicas tipo tijeras y pequeñas, bandeja, mufla a 550°C y desecadora.

Procedimiento: los mismos crisoles y muestras secas obtenidas del procedimiento de sólidos totales fueron ubicados en la mufla y se llevaron a 550°C por aproximadamente 2 horas. Una vez pasado este tiempo, los crisoles se sacaron con cuidado de la mufla y se ubicaron en una bandeja para luego ingresarse a la estufa a 105°C para disminuir la temperatura gradualmente. Al pasar de unos minutos, los crisoles fueron retirados de la estufa y se pusieron en la desecadora hasta que alcanzaron temperatura ambiente. Finalmente, los crisoles con las muestras calcinadas se pesaron en la balanza analítica y los valores fueron registrados (pc).

Para determinar los sólidos volátiles se utilizó la siguiente ecuación:

$$SV \left(\frac{g}{g} \right) = \frac{ps - pc}{ps}$$

(Ecuación 5.2)

Donde,

SV: sólidos volátiles. (g)

pc: peso de la muestra calcinada menos el peso del crisol (g)

ps: peso de la muestra seca menos el peso del crisol (g)

5.1.2.3 Determinación de humedad

La determinación de la humedad se realizó en una balanza de humedad (ver figura 5.1), la cual expone la muestra húmeda bajo una lámpara que emite pulsos de altas temperaturas que permiten secar completamente la muestra. Para cada duplicado se utilizaron 10 gr de residuo orgánico, los que se ubicaron en unas placas dentro del equipo, el cual funcionó a una temperatura de 105°C y se dejaron por el tiempo necesario hasta que el equipo terminara el secado.



Figura 5.1: Balanza de humedad utilizada PCE INSTRUMENTS, Serie PCE-MA.

5.1.2.4 Determinación de pH

La determinación de pH se realizó según lo estipulado en el documento “Protocolo de métodos de análisis para suelos y lodos” (Zagal, E. & Sadzawaka A., 2007). Se prepararon dos muestras con una suspensión del residuo orgánico con agua destilada en diferentes proporciones y se utilizó un multiparámetro Hanna Modelo H198130 para determinar el pH en el sobrenadante.



Figura 5.2: Multiparámetro Hanna utilizado.

Materiales: pinzas metálicas, agua destilada, agitador magnético, barras agitadoras metálicas, multiparámetros, vasos precipitados.

Procedimiento: en dos vasos precipitados se agregaron 100 ml de agua destilada. En un vaso se agregaron 20 g de residuo orgánico y en otro se agregaron 40 g de residuo, para luego ser agitados vigorosamente durante 10 min en el agitador metálico y se dejó reposar 2 horas. Pasado este tiempo, se utilizó el multiparámetro, el cual fue sumergido en el sobrenadante, y se registraron los valores de pH.

5.1.2.5 Composición fisicoquímica del material del residuo

Para poder conocer los contenidos de lignina, celulosa y hemicelulosa se utilizaron diferentes fuentes bibliográficas que presentaron datos al respecto de los contenidos de estos materiales en el residuo orgánico.

5.1.2.6 Determinación de propiedades químicas

Se enviaron 1,4 kg de residuos previamente secados al Laboratorio de Suelos y Análisis Foliar de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (PUCV) donde se realizaron análisis (ver Tabla 5.1) para determinar el contenido de materia orgánica, la relación C/N, contenido de nitrógeno, fósforo, potasio, conductividad eléctrica y pH.

Tabla 5.1: Metodologías utilizadas para la determinación de propiedades químicas.
(Fuente: Laboratorio de Suelos y Análisis Foliar PUCV, 2024).

Parámetro	Metodología utilizada
pH	Sadzawka A., Carrasco M. A., Grez R., Mora M. L., Flores H., Neaman A. 2006. Métodos de Análisis Recomendados para los Suelos de Chile. INIA, Santiago.
Conductividad eléctrica	
Materia orgánica	
Fosforo disponible	
Nitrógeno disponible	Sadzawka A. 1990. Métodos de Análisis de Suelos. INIA, Santiago.
Potasio intercambiable	
Nitrógeno total	Sadzawka A. Grez. R. Carrasco. M.A. Mora.M.L. 2004 Métodos de Analisis de Tejidos Vegetales. INIA. Santiago.
Relación C/N	Sadzawka A., Carrasco M. A., Grez R., y Mora M. L., 2005. Métodos de Análisis de Compost. INIA, Santiago.

5.2 Determinación del potencial de generación de biogás y fertilizante

Para poder determinar cuánto metano y fertilizante puede producir el residuo orgánico sólido generado en la Viña Errázuriz, se llevó a cabo el ensayo Potencial Bioquímico de Metano (PBM), método utilizado para determinar la biodegradabilidad del residuo y asociar la producción de metano durante la fermentación anaerobia de sustratos (Chynoweth,1993).

El ensayo consistió en someter diferentes mezclas de residuo orgánico (sustrato) con estiércol de vacuno (inóculo) a estar sumergidas constantemente en un baño termostatzado a 37°C, durante un tiempo limitado. Esta condición en conjunto a múltiples parámetros que se definieron previamente permitió que se llevara a cabo la digestión anaerobia dentro de cada vial que contenía las diferentes muestras.

5.2.1 Preparación y montaje del ensayo PBM

A continuación, se presentan las consideraciones y preparativos previos al comienzo del ensayo.

5.2.1.1 Preparación de sustrato

Tras la obtención, tratamiento y almacenamiento del residuo mencionada en el apartado anterior, se realizó un pretratamiento al residuo orgánico seco que consistió en triturar el mismo para obtener tamaños de partículas más pequeños que facilitarían el inicio del proceso anaeróbico. Luego, se humedeció nuevamente con la cantidad de agua correspondiente que tenía en un principio. Para poder establecer la cantidad de agua necesaria, se utilizó la siguiente ecuación:

$$Ma = \frac{Mr - (STr * Mr)}{STr}$$

(Ecuación 5.3)

Donde,

STr: Cantidad de sólidos totales del residuo (g/g)

Mr: Masa del residuo (g)

Ma: Masa de agua (g)

5.2.1.2 Obtención y preparación del inóculo

Se utilizó estiércol de vacuno como inóculo, el cual fue obtenido de vacas lecheras de los campos de Putaendo. Se buscó obtener estiércol lo más fresco posible, como se observa en la siguiente figura.



Figura 5.3 Estiércol de vacuno utilizado.

Posterior a la obtención del estiércol, se realizó la caracterización de este, utilizando la misma metodología presentada en el apartado 5.1.2, para obtener los valores de sólidos totales, volátiles, contenido de humedad y pH. Al igual que con el residuo, se envió una muestra de estiércol seco al Laboratorio de Suelos y Análisis Foliar de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso para obtener los valores de la relación C/N y el contenido de Nitrógeno total.

Por último, se realizó una preincubación del estiércol que consistió en depositar 300 g en diferentes vasos precipitados de 100 ml abiertos en la parte superior, mezclarlos con agua destilada y sumergirlos en el baño termostatzado a 37°C por un total de 6 días. Este proceso, conocido como desgasificación, es recomendado para eliminar todo el material orgánico biodegradable residual que pueda presentar el inóculo.

5.2.1.3 Contenido de reactores

Se utilizaron un total de 16 viales de vidrio de 100 ml como reactores y el contenido de estos estuvo relacionado a dos factores: la concentración de sólidos y la relación C/N. Se trabajó así con 4 muestras diferentes y 2 blancos (Bs y Bi) como se detalla en la tabla 5.2. Además, cada muestra fue realizada por triplicado mientras que los blancos por duplicado.

Para poder calcular las cantidades necesarias de sustrato e inóculo para realizar el ensayo teniendo en consideración ambos factores mencionados, se estableció una relación entre ambos utilizando las siguientes ecuaciones:

$$M_r * \left(\frac{\%ST_r}{100} \right) + M_i * \left(\frac{\%ST_i}{100} \right) = M_{Total}$$

(Ecuación 5.4)

$$\frac{M_r * \left(\frac{\%ST_r}{100} \right) * \%N_r * \left(\frac{C}{N} \right)_r + M_i * \left(\frac{\%ST_i}{100} \right) * \%N_i * \left(\frac{C}{N} \right)_i}{M_r * \left(\frac{\%ST_r}{100} \right) * \%N_r + M_i * \left(\frac{\%ST_i}{100} \right) * \%N_i} = \left(\frac{C}{N} \right)_{Mezcla}$$

(Ecuación 5.5)

Donde,

M r/i: Masa del residuo o inóculo (g)

%ST r/i: Porcentaje de sólidos totales del residuo o inóculo (g)

%N r/i: Porcentaje de nitrógeno del residuo o inóculo

(C/N) r/i: Relación carbono-nitrógeno del residuo o inóculo

5.2.1.4 Ajustes de pH

Fue necesario ajustar el pH de algunas muestras que se encontraban alejadas del rango neutro recomendado (6,5 – 7,5). El ajuste consistió en adicionar una solución de NaOH 5N (20 gr en 100 ml de agua destilada) a aquellas muestras que presentaran pH muy ácidos y medir los valores con un medidor de pH marca Oakton (ver figura 5.4).

5.2.1.5 Control de temperatura

Para poder llevar a cabo el ensayo PBM fue de suma importancia mantener la temperatura estable, por lo que se montó un baño termostatzado utilizando una caja plástica que podía contener un volumen máximo de 25 litros y un termocirculador, el cual permitió mantener el agua del baño a 37°C de manera continua a lo largo del ensayo.

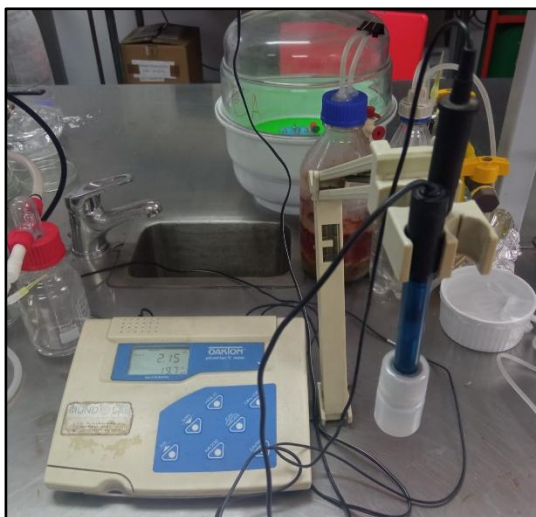


Figura 5.4: Medidor de pH Oakton utilizado.

5.2.1.6 Sistema de medición de volumen de biogás producido

El sistema de medición se montó en base al principio de desplazamiento de un líquido por el volumen de gas medido, el cual fue mencionado en el apartado 4.4, el cual consistió en montar un sistema colector, externo a los reactores, como se observa en la figura 5.5

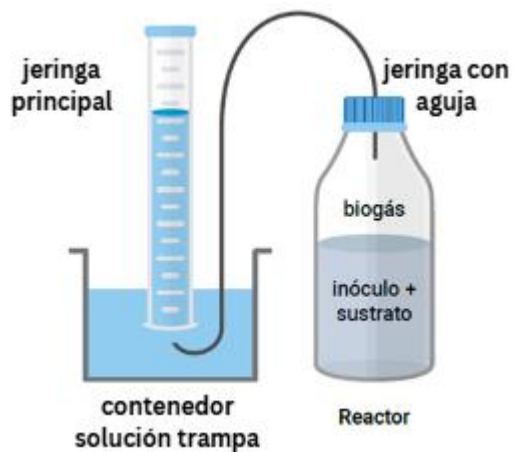


Figura 5.5: Método volumétrico por desplazamiento de líquido. (Adaptado de Bres *et al.*, 2022).

El sistema posee un contenedor que retiene una solución trampa (NaOH 1 M) y sujeta la jeringa principal, la cual permite hacer las mediciones. Además, el sistema cuenta con mangueras que ayudaron a mantener y regular el volumen de la solución al interior de la jeringa principal y a transportar el biogás generado desde los reactores hacia esta. Para evitar que el volumen de biogás medido tuviera contenidos de CO₂, el gas obtenido de los diferentes reactores atravesó brevemente la solución trampa retenida en el contenedor base, durante cada una de las mediciones.

5.2.2 Desarrollo del ensayo Potencial Bioquímico Metanogénico

Materiales: 16 viales de vidrio de 100 ml, septos de butilo y sellos de aluminio, herramienta de prensa, mangueras de goma, agujas hipodérmicas y jeringas (5 y 20 ml), nitrógeno gaseoso y lentejas de hidróxido de sodio.

Procedimiento: Cada vial fue etiquetado y rellenado con las cantidades correspondientes de sustrato e inóculo, además de llevarse a aforo de 100 ml con agua destilada. Previo a sellar los viales, el interior fue limpiado con nitrógeno gaseoso, proceso que consiste en eliminar el oxígeno presente dentro del reactor para garantizar que las condiciones del ensayo dentro de este sean óptimas para la actividad de los microorganismos. Finalizada la limpieza, cada reactor fue sellado a presión con una herramienta de prensado.

Los reactores ya sellados fueron ingresados al baño termostatzado y se mantuvieron constantemente sumergidos excepto cuando fueron retirados para realizar mediciones de biogás generado. Las mediciones se realizaron a diario durante la primera semana y con menos frecuencia al pasar los días de acuerdo con la disminución de producción de biogás, y finalizaron cuando se alcanzó un equilibrio en la generación acumulada. Cada evaluación consistió en agitar previamente el reactor para luego conectarlo al sistema de medición.

5.2.3 Modelo de regresión

Para poder analizar los resultados del ensayo se utilizó un diseño factorial 2^k , empleado ampliamente en experimentos que incluyen múltiples factores y donde es necesario estudiar el efecto de estos, tanto individualmente como en conjunto, sobre una respuesta previamente establecida (Montgomery, 2004). Este diseño ayudó a estimar si los efectos de cada combinación de factores (relación C/N y concentración de sólidos) tuvieron una diferencia estadísticamente significativa en las diferentes muestras, utilizando un criterio de confianza del 95% (menor a 0,05).

Dado que en el ensayo se desarrolló con dos factores y dos niveles, fue necesario trabajar con el diseño 2^2 . Para poder expresar los resultados del ensayo se utilizó un modelo de regresión, el cual se expresa en la siguiente ecuación.

$$y = \beta_0 + \beta_1 * x_1 + \beta_2 * x_2 + \beta_3 * x_1 * x_2 + \varepsilon \quad \text{(Ecuación 5.6)}$$

Donde,

Y: Variable respuesta

β_i : Coeficientes de regresión

x_i : Variables codificadas

ε : error

Se comenzó estableciendo cuales serían las variables respuesta a estudiar, por lo que se calcularon el potencial metanogénico y la productividad al momento donde el proceso de cada muestra llegó a la mayor producción de biogás, para así poder identificar la mejor combinación de factores para la generación de biogás mediante la digestión anaerobia.

El potencial metanogénico se determinó a través de la ecuación 5.7 mientras que la productividad se calculó utilizando la ecuación 5.8 y cuyos valores utilizados se establecieron bajo el siguiente criterio: aquel punto donde la cantidad acumulada de biogás en el que el periodo siguiente corresponda a un aumento de no más del 10% (ver ecuación 5.9).

$$PBM = \frac{VA}{SV}$$

(Ecuación 5.7)

Donde,

PBM: Potencial bioquímico metanogénico (ml de CH₄/g de SV sustrato)

VA: Volumen acumulado de biogás (ml)

SV: Sólidos volátiles del sustrato/residuo (g/g)

$$P = \frac{VA_i}{C * t}$$

(Ecuación 5.8)

Donde,

P: Productividad al momento seleccionado (ml/g*t)

VA_i: Volumen acumulado al día i (ml)

C: Masa total de la muestra (g)

t: Día i de la generación de biogás (días)

$$Pa = \frac{VA_s - VA_a}{VA_a} * 100$$

(Ecuación 5.9)

Donde,

Pa: Porcentaje de producción de biogás entre ambos puntos

VA_a: Volumen acumulado actual (ml)

VA_s: Volumen acumulado siguiente (ml)

Lo siguiente fue establecer las unidades codificadas de los factores. La codificación es un proceso que consta de asignar ciertos símbolos para definir la variable que se esté usando y transformarla, lo que permite ajustar y evaluar la validez del modelo.

Los valores resultantes de los cálculos de las respuestas (productividad y potencial metanogénico) en conjunto a las variables codificadas se trabajaron con la herramienta de análisis de datos del programa Excel para obtener estadísticas de la regresión y el análisis de varianza (ANOVA). De los datos presentados en las tablas obtenidas, se determinaron los valores de los coeficientes de regresión para establecer los modelos de ambas respuestas.

5.2.4 Evaluación de digestato

Una vez finalizado el ensayo, se analizó el digestato o digerido resultante de cada ensayo utilizando un kit químico para pruebas de suelo de la marca Hanna (ver figura 5.6) que permite evaluar diferentes parámetros, de forma cualitativa, asociados a la calidad de un fertilizante para suelos. Los parámetros medidos fueron pH, nitrógeno, fósforo y potasio.



Figura 5.6: Kit utilizado para medición de NPK y pH.

La medición consistió en extraer 2,5 ml de cada muestra y depositarlos en tubos Eppendorf de 1,5 ml para luego ubicarlos en una centrífuga (ver figura 5.7), lo que permitió separar las fases de la muestra (líquido y sólido). Una vez terminado el proceso de centrifugación, el líquido sobrenadante fue traspasado a diferentes tubos de ensayo, donde se agregaron los reactivos correspondientes para luego ser mezclados y finalmente comparados con sus respectivas tarjetas de identificación de colores.



Figura 5.7: Centrífuga CGOLDENWALL (Mini-10k) utilizada.

Obtenidas todas estas características, se buscó verificar si el digestato cumple con requisitos para ser considerado fertilizante de acuerdo a lo establecido en normativa internacional y nacional, como la ley 21.349 que establece normas sobre composición de fertilizantes y bioestimulantes. Además, se compraron sus características con biofertilizantes comerciales actuales.

5.3 Diseño de digestor anaerobio y sistemas complementarios

El tercer objetivo consistió en seleccionar un digestor apropiado para llevar a cabo el tratamiento del residuo producido en la Viña Errázuriz. Luego, diseñar un sistema de digestión anaerobia, incluyendo el dimensionamiento del digestor, estableciendo otros sistemas complementarios y las condiciones de operación.

5.3.1 Selección de biodigestor

Previo al diseño del digestor, fue importante establecer las características del sistema ya que la variedad de opciones es amplia y, dada la información revisada, no cualquiera puede tratar el residuo estudiado. Para esto, fue necesario hacer una selección del tipo de digestor más apropiado tomando en cuenta diferentes criterios, lo que permitió filtrar las diferentes alternativas. Los criterios y una pequeña explicación de cada uno se presentan a continuación.

- Idoneidad para el sustrato: se refiere a tomar en cuenta las características fisicoquímicas del residuo además de las cantidades generadas, considerando también la estacionalidad y constancia de la generación. La información obtenida de los resultados de objetivos anteriores también fue considerada.
- Recursos requeridos: se refiere al consumo de recursos hídricos y energéticos que el equipo va a requerir para funcionar.
- Espacio requerido: en referencia al área superficial requerida para la instalación del digestor y sus sistemas complementarios.
- Costos de inversión y operación: se refiere a los costos que vendrían asociados a la construcción y operación del digestor y sus sistemas complementarios.
- Facilidad de operación: en referencia a la facilidad de operación, mantención y limpieza del digestor y sus sistemas complementarios.

5.3.2 Diseño del digestor

Seleccionado el tipo de digestor a utilizar, se inició con el diseño de este, buscando determinar las dimensiones requeridas teniendo en consideración los resultados obtenidos en los objetivos anteriores. Además, se buscó establecer los parámetros de operación para mantener el proceso estable.

Volumen y dimensiones del digestor

El volumen total del digestor se calculó considerando las características del sustrato y que el volumen total del digestor es la suma de dos secciones, una destinada al sustrato y la digestión (volumen efectivo) y otra al volumen que ocupa el biogás generado (volumen libre). Es recomendable que el espacio para la digestión ocupe entre el 75 y 80% del volumen total del digestor (Campos, 2011). Igualmente se tuvo en consideración relacionar los cálculos con estipulado por Martínez (2019), donde establece que se puede estimar el volumen del biodigestor de acuerdo a la cantidad de sustrato alimentado, utilizando la siguiente tabla:

Tabla 5.2: Volumen de digestor dependiendo de la masa de sustrato alimentada. (Fuente: Martínez (2019)).

Volumen del digestor (m ³)	Masa del sustrato de alimentación máxima por ciclo (kg)
50	63.500
100	127.000
200	254.000
400	508.000
800	1.016.000
1.200	1.524.000

Parámetros de operación

Luego de dimensionar el digestor seleccionado, se establecieron los parámetros operacionales bajo los cuales funcionaría el digestor, con tal de mantener la estabilidad del proceso completo. Cabe mencionar que estos parámetros fueron establecidos según la información obtenida de objetivos anteriores.

- Flujo de alimentación del sustrato: se definió la cantidad de sustrato que sería alimentada al digestor de acuerdo con las características del residuo. Además, se consideró al sustrato en su composición completa (residuo e inóculo) para establecer las cantidades y la relación de C/N.
- Tiempo de digestión: se refiere al tiempo que necesitan los microorganismos para degradar el sustrato dentro del digestor, es decir, el tiempo promedio en que el residuo permanecerá en el digestor. Este parámetro se estableció de acuerdo con los resultados obtenidos en la realización del ensayo PBM.
- Temperatura: Se estableció el régimen de funcionamiento en el que ocurrirá la digestión, en términos de temperatura, es decir, rangos mesofílicos o termofílicos.

- Ajustes de pH: se debe establecer el pH operacional dentro del digestor, además de especificar que compuestos o tratamientos se podrán utilizar para ajustar sus valores iniciales.
- Concentración de sólidos totales: fue necesario establecer la concentración de sólidos totales en el digestor, lo que permitió definir las cantidades de agua requeridas para obtener el valor determinado.

5.3.3 Diseño de sistemas complementarios

Como fue mencionado en capítulos anteriores, para que los digestores puedan finalizar completamente el tratamiento de un residuo se requiere de sistemas complementarios, por lo que establecer y definir aquellos sistemas resultó de suma importancia.

Los sistemas investigados y establecidos fueron: almacenamiento, pretratamiento, agitación, tratamiento de biogás y tratamiento de digestato/digerido. Cabe mencionar que algunos de estos sistemas presentaron múltiples alternativas por lo que se realizaron selecciones bajo diferentes criterios establecidos.

Sistema de Almacenamiento y pretratamiento

Fue necesario establecer y dimensionar un sistema de almacenamiento para contener y mantener el residuo hasta que sea ingresado al proceso de digestión, tomando en consideración la información obtenida de los resultados de los objetivos anteriores. Por otro lado, se establecieron las condiciones de entrada del sustrato al digestor, las que permitieron identificar el tipo de pretratamiento que el residuo debería recibir.

Sistema de agitación

Para seleccionar un agitador y establecer sus características de operación se consideró lo descrito en capítulos anteriores, donde se buscó que la elección cumpliera con los siguientes criterios:

- Que posea las características adecuadas para el tipo de residuo (tamaño, forma, potencia y velocidad de rotación).
- Que sus materiales sean resistentes a las condiciones dentro del digestor.

Sistema de tratamiento de biogás y digestato

Fue necesario establecer el tipo de gestión para tratar el biogás resultante del proceso. Para esto se consideraron principalmente los tratamientos generales, explicados en apartados anteriores, como la purificación mediante la eliminación de compuestos como el agua.

Por otro lado, también fue necesario establecer la gestión que recibiría el digestato o digerido resultante del proceso. Para esto se tomó en consideración los resultados de objetivos anteriores como también lo explicado en apartados anteriores sobre los tipos de tratamiento posibles.

5.4 Análisis comparativo al utilizar biogás como sustituto energético

El desarrollo de las actividades para cumplir el último objetivo específico, consistieron en analizar información respecto a los diferentes consumos energéticos de la Viña Errázuriz para poder determinar si la utilización de biogás podría presentar un beneficio en algún sector de la planta de producción.

5.4.1 Consumo energético de la Viña Errázuriz

Se tuvo acceso a información útil respecto a los consumos energéticos de la viña. Los datos fueron analizados en base a los consumos durante los meses de vendimia y a las cantidades producidas de biogás con sus respectivas características, lo que permitió seleccionar un sector energético específico para utilizar el biogás producido durante la digestión de cada lote. El biogás producido por cada lote se calculó utilizando la ecuación 5.10.

$$V_M = PBM * M_r * SV_r$$

(Ecuación 5.10)

Donde,

V_M : Volumen de CH_4 (m^3)

PBM : Valor del PBM del sustrato ($m^3 CH_4/kg SV$).

M_r : Masa de residuo ingresada en el lote (kg).

SV_r : Valor de sólidos volátiles del residuo/sustrato (kg de SV/kg de residuo/sustrato).

Cabe explicar, para evitar confusiones, que al mencionar los sólidos volátiles del sustrato se hace referencia al valor calculado de SV del residuo, el cual fue utilizado como sustrato en el ensayo PBM.

5.4.2 Análisis comparativo al utilizar biogás como reemplazo

Finalmente, fue fundamental realizar un análisis comparativo entre la situación energética actual seleccionada y la situación utilizando biogás como sustituto, con tal de comprobar si la cantidad de biogás producido podría cumplir con las necesidades del sector energético seleccionado. Para poder calcular el consumo de biogás de cada caldera, se utilizó la ecuación 5.11.

$$C_B = \frac{C_{GLP} * PC_{GL}}{PC_B}$$

(Ecuación 5.11)

Donde,

C_B : Consumo de biogás de caldera (m^3/h)

C_{GLP} : Consumo de GLP de caldera (m^3/h)

PC_{GL} : Poder calorífico de GLP ($kcal/m^3$)

PC_B : Poder calorífico del biogás ($kcal/m^3$)

6. Resultados

6.1 Resultados de cuantificación y caracterización de los residuos orgánicos sólidos

La Viña Errázuriz presenta ingresos de uva durante la temporada de vendimia, la que corresponde principalmente a los meses de febrero, marzo, abril y mayo de cada año. Durante estos meses se reciben grandes cantidades de uva y se generan los residuos orgánicos sólidos correspondientes al orujo y escobajo.

6.1.1 Cuantificación de ingresos de uva

Información respecto a los ingresos de uva en temporada de vendimia fue solicitada a la Viña Errázuriz. A continuación, se observan los datos recopilados en la tabla 6.1, que presenta los ingresos totales anuales de uva registrados desde el 2012 hasta el presente año (ver anexo 8.1 totalidad de datos). En la figura 6.1, se desglosa la cantidad de uva ingresada durante los meses correspondientes a la temporada de vendimia del presente año 2024.

Tabla 6.1: Ingresos de uva anuales. (Fuente: Viña Errázuriz)

Año de cosecha	Uva recibida (kg)
2020	12.024.683
2021	13.568.036
2022	10.920.798
2023	13.654.778
2024	11.929.338

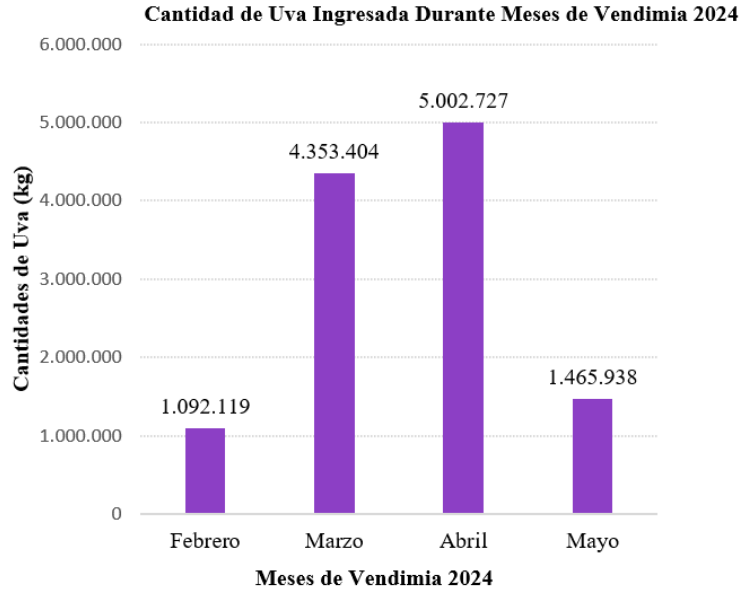


Figura 6.1: Ingresos mensuales de uva durante temporada de vendimia 2024. (Fuente: Viña Errázuriz).

Durante los meses de vendimia (de febrero a mayo) se recibió un total de 11.914.188 kg de uvas, valor que no completa el total de uva recibido mencionado en la tabla 6.1 ya que no considera el valor ingresado de uva durante enero.

6.1.2 Cuantificación de residuos

Se solicitó información respecto a las cantidades de residuos orgánicos declarados en el SINADER y se obtuvieron los datos presentados en la tabla y figura 6.2, los cuales han sido registrados solo desde el año 2022.

Tabla 6.2: Cantidad de residuos orgánicos anuales declarados en SINADER. (Fuente: Viña Errázuriz).

Año	Cantidad (kg)
2022	1.138.870
2023	1.246.820
2024	822.560

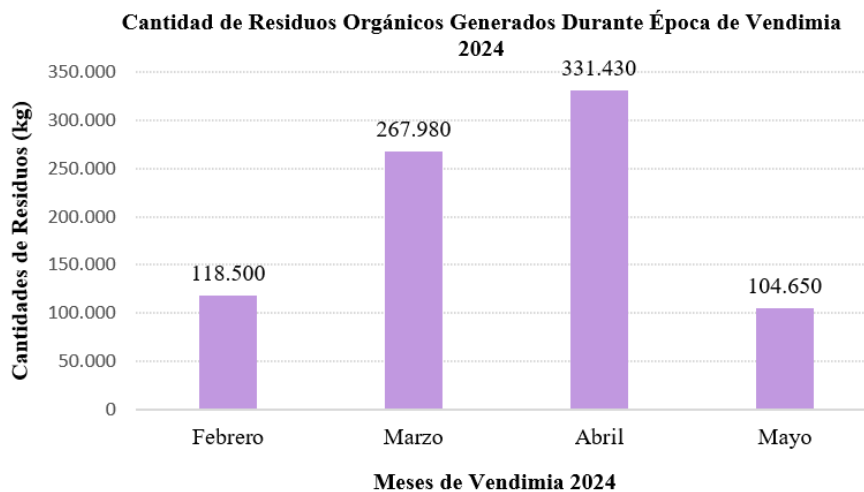


Figura 6.2: Cantidades generadas de residuos orgánicos sólidos durante vendimia de 2024. (Fuente: Viña Errázuriz)

Del total de uva recibida durante los meses de vendimia y la cantidad de residuos orgánicos declarados, se podría establecer la siguiente relación.

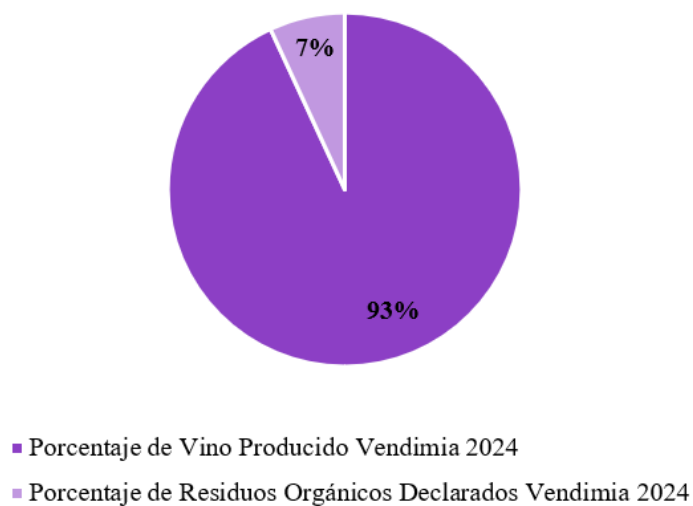


Figura 6.3: Porcentajes en peso de residuos y vino generados del total de uva recibida en vendimia 2024. (Fuente: Viña Errázuriz)

Cabe mencionar que, dada la información compartida por el Departamento de Prevención y Medio Ambiente de la Viña, lo que es declarado como residuo orgánico lo conocen como “orujo” el cual está compuesto principalmente de orujo agotado, escobajo y semillas de uva.

6.1.3 Caracterización del residuo

El residuo orgánico generado en la Viña Errázuriz es principalmente orujo y escobajo, cuyo manejo actual consiste en ser depositado en el patio de vendimia dentro de las dependencias de la viña, a la intemperie y normalmente cubierto con malla raschel (ver figura 6.4). Este residuo orgánico es almacenado de tal manera hasta que un camión, el cual es cargado con los residuos mediante una retroexcavadora, los retira para llevarlos a destino final.

Con ayuda del Departamento de Prevención y Medio Ambiente de la Viña Errázuriz, se pudo acceder a sacar muestras del residuo orgánico, las cuales fueron extraídas directamente del depósito, obteniendo un total aproximado de 9 kg. Previo a la recolección de muestras, una cantidad se llevó a laboratorio donde se utilizó la estufa a 60°C para secar por tandas (ver figura 6.5), utilizando bandejas aptas para el proceso de secado. Otra tanda de residuo orgánico fue almacenada en un congelador para ser utilizada en futuras actividades.



Figura 6.4: Depósitos de residuos orgánicos sólidos en patio de vendimia Viña Errázuriz.



Figura 6.5: Muestras del residuo orgánico en bandejas para secado.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en el desarrollo de la actividad “Caracterización del residuo orgánico”. En la tabla 6.3 se resumen la totalidad de los resultados experimentales, mientras que todos los datos se adjuntan en los anexos 8.2 a 8.7.

Tabla 6.3: Valores experimentales de la caracterización del residuo.

Sólidos totales (% g/g)	Sólidos volátiles (% g/g)	Humedad (%)	pH
33,65%	80%	71,35	4,3

6.1.3.5 Composición fisicoquímica

Como fue mencionado en capítulos anteriores, el residuo generado en la Viña Errázuriz está principalmente compuesto por orujo, escobajo y semillas de uva. El orujo es el resultado obtenido del proceso de prensado y fermentación del vino, que es la piel o cáscara de la uva, la pulpa, semillas y tallos residuales, mientras que el escobajo o también llamado raspón, es resultado del proceso de despallado y son las ramas o tallos que mantienen las uvas unidas formando el racimo.

En las figuras 6.6 y 6.7 se puede observar el residuo orgánico generado en la Viña Errázuriz y los principales compuestos de la uva.



Figura 6.6: Residuos orgánicos sólidos generados en Viña Errázuriz.

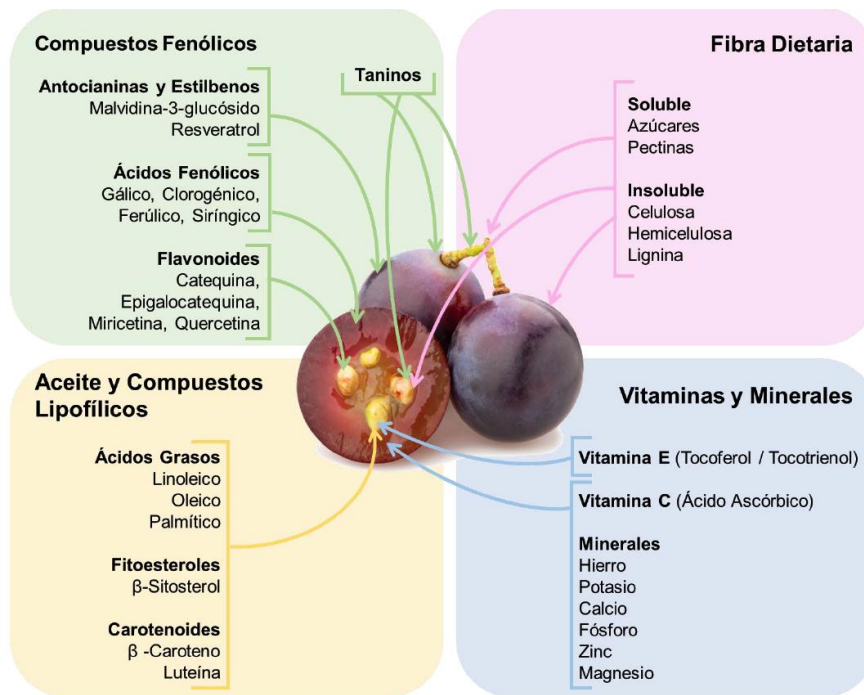


Figura 6.7: Distribución de los principales compuestos bioactivos en los componentes del orujo de uva. (Fuente: López et al., 2023).

Como fue mencionado en el apartado 4.3, conocer la composición fisicoquímica del sustrato es sumamente importante dado que puede afectar directamente el proceso de la digestión anaerobia, principalmente a su fase inicial llamada “Hidrólisis”, esto a causa de que son compuestos de baja biodegradabilidad, por lo que necesitan de tiempos más largos para ser degradados.

En referencia a estos compuestos de baja biodegradabilidad, Martínez (2019) establece que el raspón o el escobajo posee grandes cantidades de materia orgánica que se pueden encontrar en forma de celulosa, hemicelulosa y lignina. Indiveri (2022), refuerza esta información, mencionando que los tallos, hojas y ramas están constituidos principalmente por material lignocelulósico, es decir, celulosa, hemicelulosa y lignina. Igualmente, Rani y otros autores (2020) establecen que este residuo orgánico posee cantidades de celulosa (27-75%) y lignina (17-24%).

López *et al.*, (2022) indican que el orujo de uva puede ser considerado como una fuente de fibra dietaria y puede llegar a contener principalmente pectina (37 - 54%), celulosa (27 - 37%), lignina (16,8 - 24%) y otros polisacáridos. Establecen que estos compuestos, además de la hemicelulosa, son los principales constituyentes de la pared celular en el orujo de uva.

Respecto a la semilla presente en el orujo, los autores mencionados en el párrafo anterior establecen que está principalmente constituida por celulosa y pectina, mientras que la piel de la uva presenta una fuente considerable de hemicelulosa que puede formar complejos de lignina. Indiveri (2022), establece algunos porcentajes de composición para las semillas, donde el mayor corresponde a lignina (43,8%), lípidos (10%), celulosa y hemicelulosa (36,8%) y proteínas (6,87%).

6.1.3.6 Análisis de Laboratorio Externo

La muestra enviada al Laboratorio de Suelos y Análisis Foliar de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso fue recibida y analizada para obtener diferentes características del residuo, las cuales se presentan en la tabla 6.9.

Tabla 6.4: Valores experimentales del análisis de laboratorio externo.

pH	CE (dS/m)	Materia Orgánica (%)	Nitrógeno Disponibile (mg/kg)	Nitrógeno Total (%)	Fósforo Disponibile (mg/kg)	Potasio Intercambiable (mg/kg)	Potasio Intercambiable (cmol+/kg)	Relación C/N
3,95	8,34	76,7	79,2	2,14	1866	49049	125	20,2

En referencia a los resultados obtenidos, se puede mencionar que en términos de pH se observa claramente que el residuo presenta características ácidas, por lo que este valor se transforma en un factor importante a considerar para el desarrollo del ensayo PBM. Respecto al porcentaje de materia orgánica, cabe mencionar que el valor es similar y cercano al obtenido en la prueba de SV (80%).

Respecto a la relación C/N, según la bibliografía consultada y lo estipulado en el capítulo 4, presenta un valor que estaría dentro de los rangos recomendados (16 – 25 por Deublein & Steinhauser, 2008) o cercano a otros (20 – 30 por Tabatabaei & Ghanavati, 2018)

6.2 Resultados determinación del potencial de generación de biogás y fertilizante

6.2.1 Preparación y montaje

La preparación y montaje del ensayo comenzó con el pretratamiento del residuo. Se contaba con 397 gramos de residuo seco y utilizando la ecuación 5.3 se calculó que sería necesario adicionar aproximadamente 783 ml de agua. Para esto se prepararon diferentes tandas con menor cantidad de residuo seco y agua para facilitar así la homogenización de la mezcla.

Por otro lado, la preparación y caracterización del inóculo se llevaron a cabo según lo estipulado y los resultados se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 6.5: Resultados caracterización de estiércol de vacuno.

Sólidos Totales (g/g)	Sólidos Volátiles (g/g)	Humedad (%)	pH	Nitrógeno Total (%)	Relación C/N
0,15	0,69	82,63	7,2	2,2	17,2

El estiércol de vacuno presentó una relación C/N (17,2) bastante cercana a la del residuo (20,2), por lo que el rango de trabajo para la selección de las relaciones C/N de cada muestra se encontró limitado entre estos valores. Por lo tanto, las relaciones seleccionadas (18,5 y 20) representaron los extremos del rango establecido.

Respecto a los porcentajes seleccionados de concentración de sólidos, se estableció trabajar con valores de 8 y 15%, ya que según lo establecido en el apartado 4.4.1.1 se recomiendan valores entre 2 y 10%, sin embargo, se buscó estudiar el comportamiento de las muestras con un 15% en contenido de sólidos para evaluar si la digestión anaerobia podría funcionar con gran cantidad de residuos.

La selección de estos valores permitió establecer diferentes cantidades de inóculo y sustrato para cada muestra, las que se detallan en la tabla 6.7. (Ver anexo 8.9 para cálculos).

Tabla 6.7: Variables establecidas para cada muestra.

Reactor	C/N	Concentración de Sólidos	Cantidad de Residuo (g)	Cantidad de Inóculo (g)	Total en reactor (g)
M1	18,5	8	10,46	29,86	40,32
M2	18,5	15	19,62	55,98	75,6
M3	20	8	22,23	4,46	26,69
M4	20	15	41,68	6,49	48,17
Bs	20,2	15	48,17	0	48,17
Bi	17,2	15	0	48,17	48,17

Finalmente, se obtuvieron 4 muestras diferentes (cada una con triplicado), siendo M1 la muestra con menos cantidad de residuo y M4 la que más contiene residuo. Cabe mencionar que todos los reactores fueron llevados a aforo de 100 ml con agua destilada, lo que permitió mantener un “headspace” de aproximadamente 22 ml (18%).

A continuación, se realizaron los ajustes correspondientes de pH, lo que consistió en utilizar múltiples muestras y adicionarles diferentes cantidades de NaOH hasta encontrar la dosis necesaria que estabilizara el pH de la muestra. Los valores finales se presentan en la tabla 6.8. Cabe mencionar que algunas muestras no fueron ajustadas ya que presentaban valores de pH dentro del rango recomendado o cercanos a la neutralidad.

Como fue explicado en la metodología, para controlar la temperatura se montó un baño termostático (ver figura 6.8). Además, se montó un sistema de medición que como se observa en la figura 6.9 inicia con la aguja insertada en el reactor, la que dirige el biogás generado, a través de la manguera, hacia el sistema colector que consta de la caja de plástico y la jeringa principal rellenos con la solución de NaOH. Una vez el biogás llega a la base de la jeringa principal, entra en contacto con la solución filtradora y desplaza el volumen que esta ocupa dentro de la jeringa principal. Así, el volumen desplazado de solución dentro de la jeringa es el volumen de biogás generado en el reactor. Para reiniciar el sistema y tomar una nueva medición, se utiliza la segunda jeringa, la cual permite vaciar completamente la jeringa principal y volver a llenarla con la solución de NaOH.

Tabla 6.8: pH medidos en muestras ajustadas y volúmenes de NaOH adicionados.

Reactor	Muestra	pH inicial	Solución agregada (ml)	pH ajustado
Bs	Bs - 1	4,3	4	6,88
	Bs - 2			7,42
M3	M3 - A	4,1	1,7	7,48
	M3 - B			6,18
	M3 - C			7,2
M4	M4 - A	4,15	3,3	7,6
	M4 - B			6,3
	M4 - C			7,9

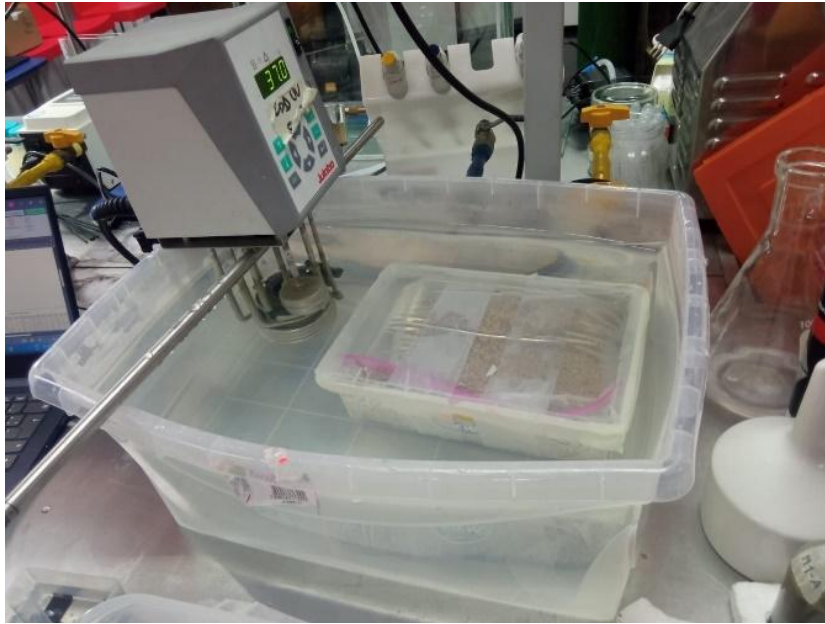


Figura 6.8: Baño termostatzado montado.

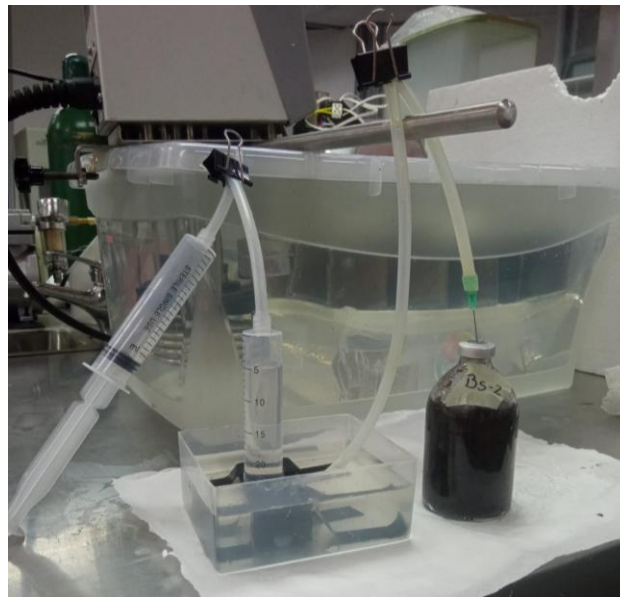


Figura 6.9: Sistema de medición montado para medir el biogás.

6.2.2 Resultados de ensayo PBM

El ensayo PBM tuvo una duración total de 39 días, donde se realizaron 15 mediciones a cada reactor. A continuación se presentará toda la información obtenida en diferentes gráficos, mientras que los datos totales obtenidos y otros gráficos adicionales se adjuntan en el anexos.

El resultado de PBM expresado en ml de CH₄/g SV sustrato, se calculó asumiendo que los valores de biogás medidos presentaron un 70% en composición de CH₄. Los calculos realizados se adjuntan en el anexo 8.10 y los valores se presentan en la tabla 6.9.

Tabla 6.9: Promedios y desviaciones estándar del PBM de cada muestra.

Muestra		M1	M2	M3	M4
PBM (ml de CH ₄ / g SV)	Promedio	145,57083	283,09167	214,40417	379,225
	Desviación estandar	6,51	20,65	50,22	25,11

6.2.2.1 Producción acumulada

Los volúmenes acumulados medidos para cada muestra fueron promediados y calculadas sus respectivas desviaciones estandar (Ver anexo 8.11). Se presentan los gráficos de los datos resultantes en las figuras 6.10 hasta 6.14.

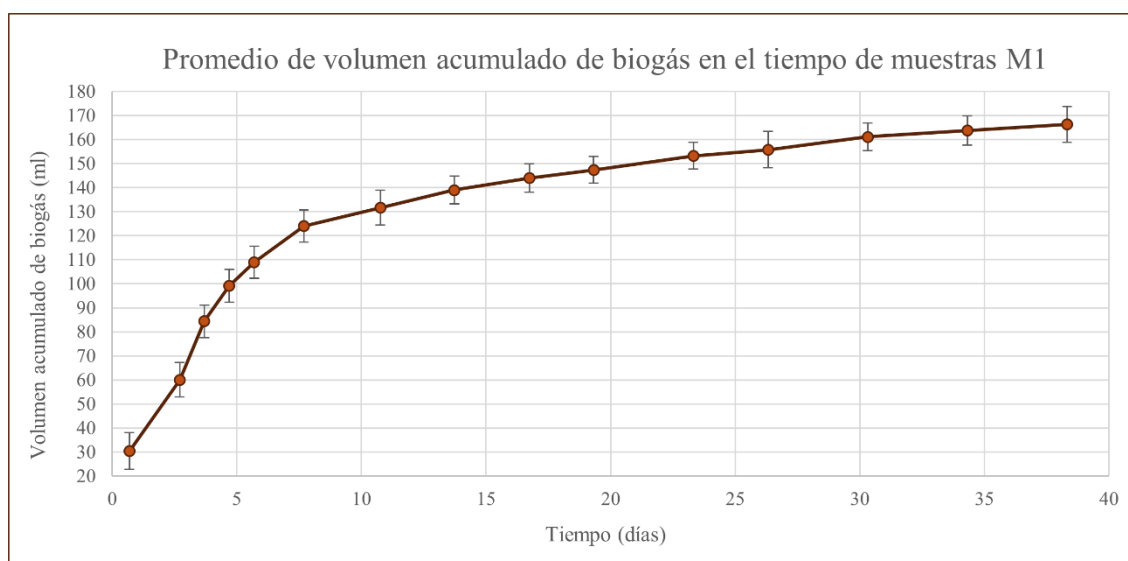


Figura 6.10: Promedio de volumen acumulado de biogás en el tiempo de muestras M1.

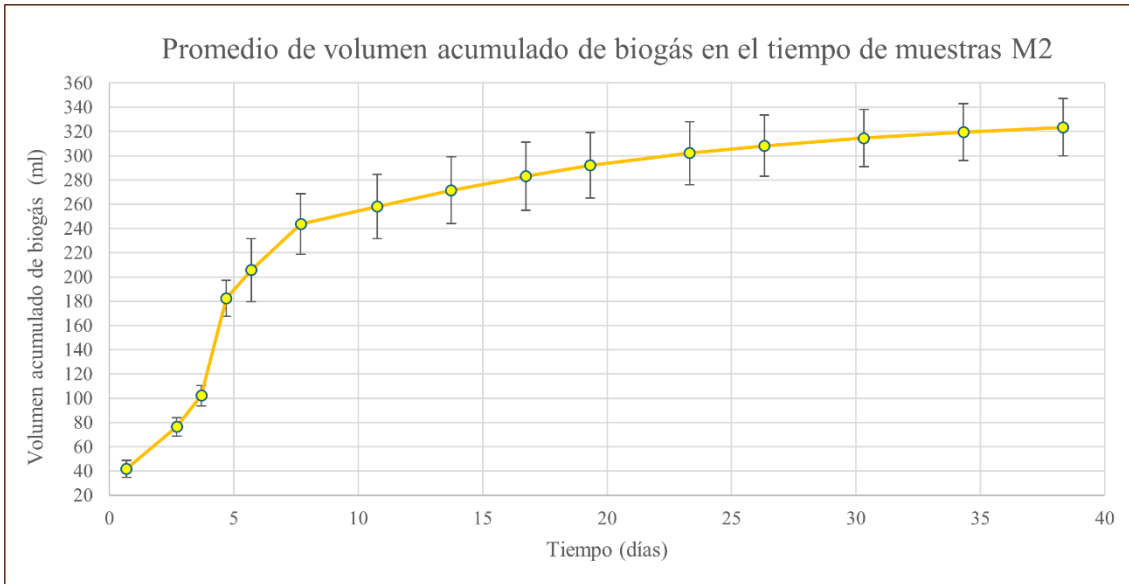


Figura 6.11: Promedio de volumen acumulado de biogás en el tiempo de muestras M2.

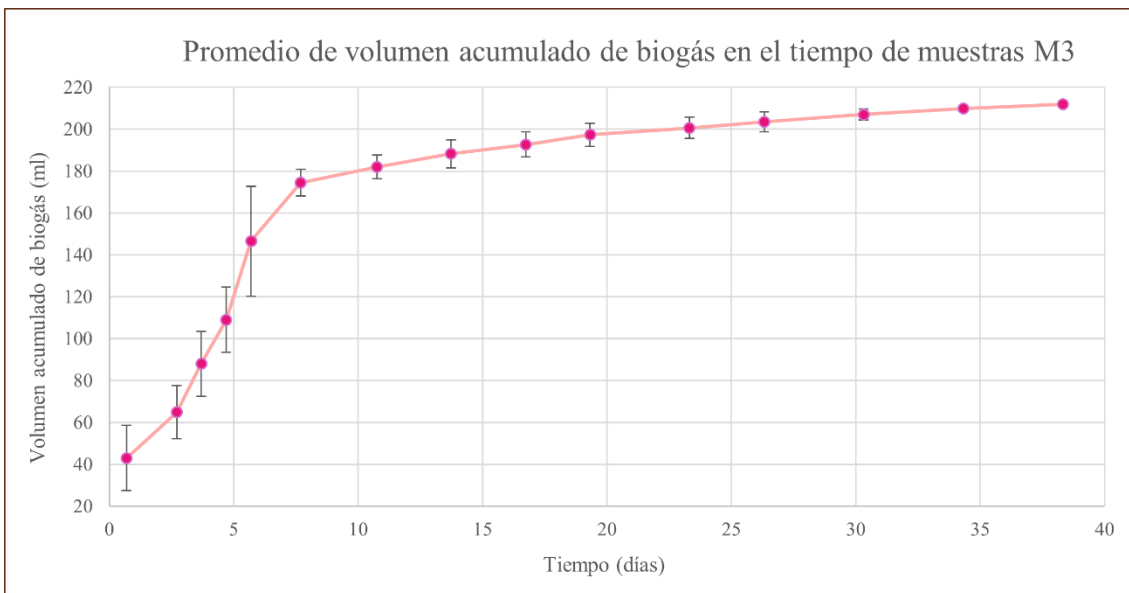


Figura 6.12: Promedio de volumen acumulado de biogás en el tiempo de muestras M3.

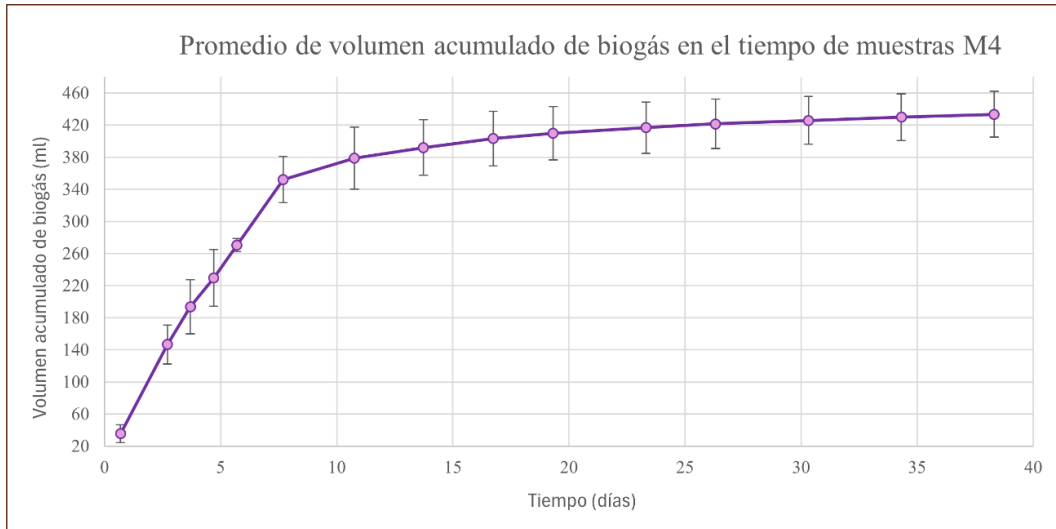


Figura 6.13: Promedio de generación acumulada de biogás en el tiempo de muestras M4.

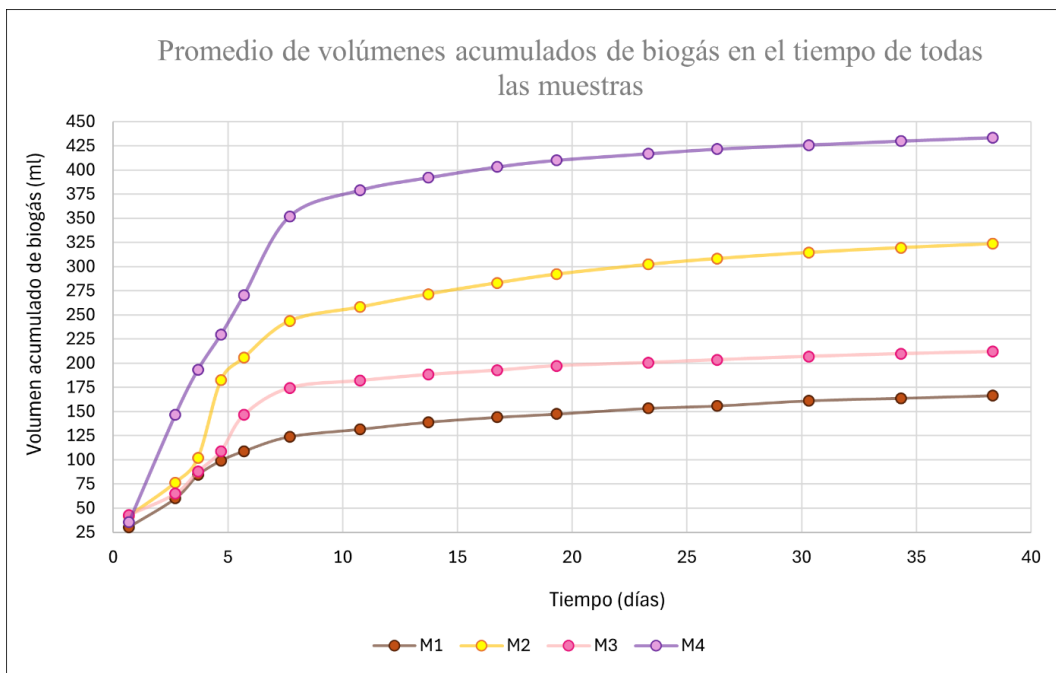


Figura 6.14: Promedio de volúmenes acumulados de biogás en el tiempo de todas las muestras.

Analizando la información presentada en los gráficos, se puede establecer que las muestras que más biogás generaron son M4 y M2, siendo M4 la de mayor producción. Las muestras M2, M3 y M4 presentaron sus mayores producciones entre los días 4 y 7, lo que se observa en la gráfica con los incrementos de pendientes notables en M2 y M3.

Todas las muestras parecen tener un comportamiento similar al inicio del ensayo, donde M2 y M3 presentaron un aumento significativo en la generación a partir del día 4 y 5. La muestra M4 presenta un volumen acumulado constante en el tiempo que se observa como una pendiente los primeros 8 días, lo cual podría estar asociado al alto contenido de residuo de la muestra o al bajo contenido de inóculo.

Se observa que hay una clara tendencia en todas las muestras a alcanzar un equilibrio en la producción diaria a partir del décimo día, lo que significaría que ya no hay una producción significativa.

Respecto a las muestras M3, las réplicas A y C presentaron un comportamiento similar, mientras que la réplica B produjo mucho más en comparación (ver anexo 8.13). Por esta razón, la desviación estándar incrementó demasiado y para ser presentado en el gráfico de la figura 6.12 solo se consideraron las réplicas A y C.

6.2.2.2 Potencial metanogénico y productividad

Los valores obtenidos de potencial bioquímico metanogénico se presentan en la Tabla 6.10. Los cálculos se muestran en el anexo 8.14.

Tabla 6.10: Potencial bioquímico metanogénico promedio de las diferentes muestras.

Muestra	M1	M2	M3	M4
Volumen acumulado promedio (ml)	166,37	323,53	254	433,4
Sóldos volátiles sustrato/residuo (g/g)	8	15	8	15
PBM (ml de CH₄/ g de SV)	145,57	283,092	214,4	379,23

|

Los valores de productividad fueron calculados según lo mencionado en el capítulo 5.2. Utilizando la ecuación 5.9, se estableció que a partir del día 7 de generación se presentaría un aumento de producción menor al 10%, por lo que este punto se seleccionó para calcular la productividad. Los valores obtenidos se presentan en la Tabla 6.11.

Tabla 6.11: Productividad promedio de todas las muestras.

Muestra	M1	M2	M3	M4
Productividad (ml de CH₄/día)	16,118	31,687	22,689	45,768

A continuación, se presentan los gráficos correspondientes a los cálculos de productividad asociados a la totalidad de días de duración del ensayo, en las figuras 6.15 y 6.16, cuyos datos se adjuntaron en el anexo 8.15 y 8.16.

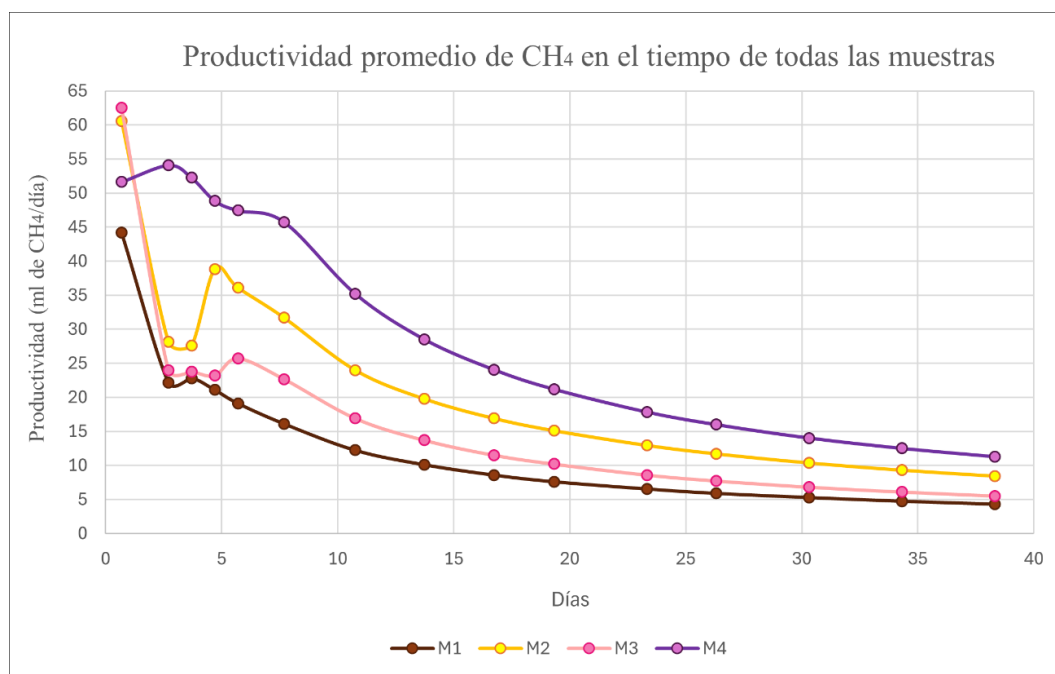


Figura 6.15: Productividad promedio de metano para las muestras M1, M2, M3 y M4.

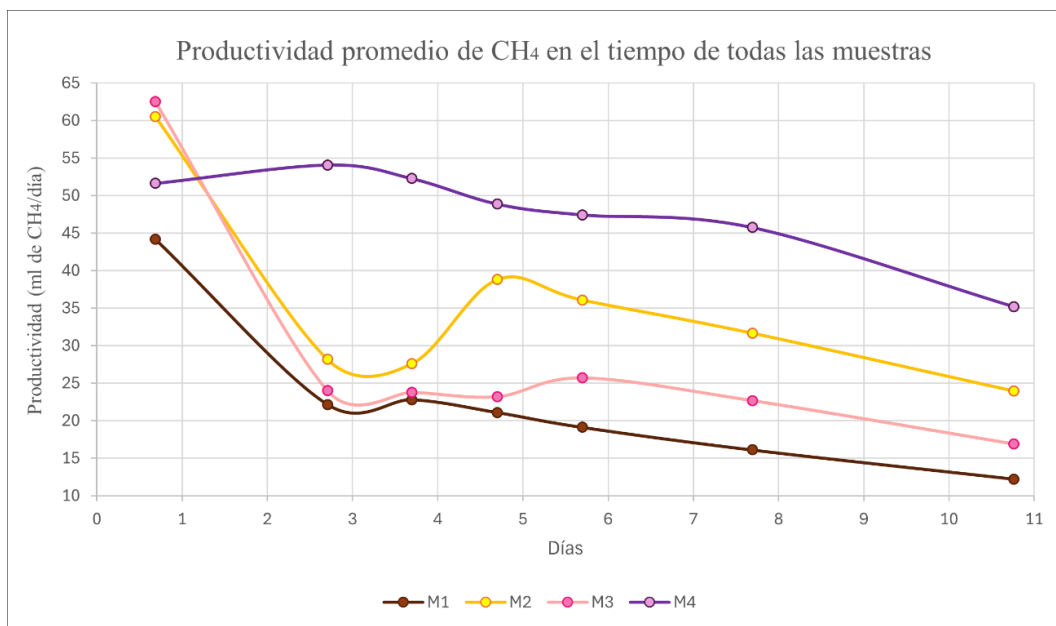


Figura 6.16: Productividad promedio de metano para las muestras M1, M2, M3 y M4.

Respecto a estos gráficos, es evidente que la curva representante de la muestra M2 presenta un aumento en la productividad entre el día 4 y 5, al igual que la muestra M3 lo presenta pero menos pronunciado y dos veces entre el día 3, 4 y 6. Además se observa claramente que a partir del día 8 la productividad comienza a disminuir constantemente en todas las muestras.

6.2.2.3 Diseño experimental y regresión

Las unidades codificadas se presentan en la tabla 6.12. Conociendo estos valores, se procedió a preparar la tabla con toda la información necesaria para hacer la regresión de los datos seleccionados. La tabla completa se adjunta en el anexo 8.17

Tabla 6.12: Variables codificadas para calcular los efectos del diseño 2^2 .

Factor		Variables Codificadas		
C/N (A)	% Sólidos (B)	A	B	AB
18,5	8	-1	-1	1

Continuación tabla 6.12: Variables codificadas para calcular los efectos del diseño 2².

18,5	15	-1	+1	-1
20	8	+1	-1	-1
20	15	+1	+1	1

El análisis de datos presentó información variada, sin embargo, los valores que se destacaron fueron los de probabilidad, donde se considera que si presenta un valor menor a 0,05 se puede establecer que el efecto del factor seleccionado sobre la respuesta seleccionada resulta significativo. De esta manera se puede concluir lo siguiente:

Sobre el Potencial Bioquímico Metanogénico

La relación C/N y la concentración de sólidos presentaron un efecto significativo sobre la estimación del PBM, al presentar valores menores a 0.05, mientras que la combinación de ambos factores no se consideró un resultado estadísticamente significativo. Por lo tanto, se puede decir que este modelo representa adecuadamente los datos experimentales. La tabla completa obtenida se presenta en el anexo 8.18.

Para el cálculo de la ecuación de regresión, los coeficientes utilizados fueron los resultantes del análisis de datos de los valores originales, por lo que se utilizaron los valores establecidos en la tabla 6.17.

Tabla 6.17: Coeficientes utilizados en la ecuación de regresión para Potencial Metanogénico.

Factor	Coficiente
Intercepción (β_0)	-475,7403
C/N (β_1)	25,08889
Concentración de sólidos (β_2)	-28,4542
Interacción (β_3)	2,6

Sobre la Productividad

Al igual que en el modelo anterior, la relación C/N fue el único factor en presentar un efecto significativo, ahora sobre la productividad en el punto seleccionado. Dado que el valor obtenido resultó ser mas significativo en comparación al obtenido en el modelo de PBM, este modelo representa de mejor manera los resultados de esta respuesta y, por lo tanto, se ajusta de mejor forma a los datos experimentales. La información obtenida se presenta en el anexo 8.19.

Para el cálculo de la ecuación de regresión los coeficientes utilizados fueron los resultantes del análisis de datos de los valores originales, por lo que se utilizaron valores presentados en la tabla 6.18.

Tabla 6.18: Coeficientes utilizados en la ecuación de regresión para Productividad.

Factor	Coefficiente
Intercepción (β_0)	-8,7539
C/N (β_1)	0,4936
Concentración de sólidos (β_2)	0,1751
Interacción (β_3)	-0,0093151

6.2.3 Características del digestato y propiedades fertilizantes

Utilizando el kit Hanna, la evaluación cualitativa de los diferentes parámetros se presenta en la Tabla 6.19.

Conociendo el hecho de que la presencia de estos compuestos en el sustrato suelen mantener sus porcentajes originales después de la digestión anaerobia, los valores determinados y presentados en la tabla 6.4, se verían reflejados en esta evaluación.

Tabla 6.19: Presencia de compuestos NPK en digestatos obtenidos.

Muestra	pH	N	P	K
M1 - A	5,81	traza	media-alta	media
M1 - B	6	traza	media-alta	media
M2 - B	5,86	traza	media-alta	alta
M2 - C	5,87	traza	alta	alta
M3 - B	5,76	traza	alta	baja
M3 - C	5,63	traza	alta	baja
M4 - A	5,84	traza	alta	alta
M4 - C	6,14	traza	alta	media

6.2 Resultados de diseño de digester anaerobio y sistemas complementarios

6.2.1 Selección del digester

Durante la selección del tipo de digester se reunió la siguiente información respecto a los diferentes criterios considerados.

Dado que el sustrato se obtiene solamente durante los meses de vendimia, es decir, gradualmente entre los meses de febrero y mayo, es esencial considerar esta información para la selección del digester, específicamente porque el flujo de alimentación no sería constante en el tiempo. Dada esta característica es que se ha decidido seleccionar un digester de tipo discontinuo, lo que permitirá funcionar por lotes y tratar el residuo estacional.

Según los tipos de digestores discontinuos descritos en el capítulo 4, se decidió realizar el diseño de un digester continuo clásico, que destaca por su simpleza de funcionamiento y operación. Este tipo de digestores pueden lidiar perfectamente con sustratos con las características como las que presenta el residuo estudiado en este trabajo. Además, pueden ser construidos en diferentes tamaños para adecuarse a cantidades más industriales y, dado que funcionan por lotes, es mucho más fácil realizar mantenimientos entre ciclos de digestión (Martínez, 2019).

6.3.2 Diseño del digester

Para calcular el volumen del digester se consideró lo estipulado en la tabla 5.3 que establece un volumen asociado a la cantidad de sustrato máxima que podría ingresarse en un lote. Para determinar la cantidad de sustrato máximo por lote primero fue necesario establecer dos factores importantes: el tiempo de digestión de cada lote y la composición de cada lote, ambos valores se calcularon de acuerdo a la generación del residuo en el tiempo.

Respecto al cálculo del tiempo de digestión, se tomaron en consideración los resultados obtenidos del ensayo PBM revisados en el capítulo 6.2. Estos establecen que la producción de biogás parece alcanzar una fase estacionaria entre los días 15 y 20 después de iniciado el proceso, donde teóricamente la tasa de generación diaria de biogás no supera el 1% del volumen acumulado. Por esta razón, se estableció un tiempo de digestión de 25 días, con tal de aprovechar al máximo la generación de biogás y asegurar que el digestato resultante se encuentre estable y en perfectas condiciones para ser utilizado como fertilizante. Para un ciclo completo de 29 días

se considerarían 2 días para el pretratamiento del residuo y la preparación del sustrato, 25 días para la digestión y 2 días para el vaciado y la limpieza.

Dado que durante la vendimia de 2024 se generaron 822.560 kg de residuos, se decidió dividir esta cantidad en 4 lotes a tratar, por lo que el contenido y características de cada lote queda descrito a continuación. Los cálculos se presentan en el anexo 8.20.

- Cantidad de residuo: considerando que el total es 822.560 y se tratarán 4 tandas, cada lote estará compuesto de 205.640 kg de residuos.
- Cantidad de inóculo: como se busca cumplir una relación S/I de 6,4, la cantidad de inóculo siempre será de 32.131 kg.
- Contenido de sólidos: el sustrato debe poseer un 15% de sólidos.
- Adición de agua: conociendo la cantidad de residuo e inóculo y sus respectivas composiciones de humedad, y considerando que se debe alcanzar un 85% de humedad, la cantidad de agua a adicionar a cada lote es de 255.679 L (0,8 L por kg de residuo).
- Composición de cada lote: en total cada lote será de 493.450 kg considerando el residuo, el inóculo y el agua adicional.
- Relación C/N: con los valores establecidos se cumple una relación C/N de 20.

Por otro lado, para asegurar que la digestión ocurra sin problemas en el tiempo determinado, la temperatura es un factor importante que monitorear y controlar, por lo que se estableció que el rango óptimo es el mesofílico entre 25 y 35 °C, queda como sugerencia el análisis de la necesidad de utilizar un sistema térmico que permita regular la temperatura dentro del digestor, considerando que sería principalmente utilizado durante los meses de invierno y las temperaturas en Panquehue y todo el Valle del Aconcagua pueden alcanzar grados bajo 0 durante las noches, mientras que los días suelen ser cálidos.

Para poder dimensionar el volumen del digestor se ha establecido que, según lo indicado en la tabla 5.3, posea una forma cilíndrica correspondiente al volumen total de 400 m³, asociado a una alimentación máxima de 580.000 kg. Dado que cada lote tendrá un total de 493.450 kg, el espacio sobrante en el digestor (15%) podrá mantener el biogás previo al ingreso de este al sistema de tratamiento. De esta manera el cálculo de las dimensiones entrega los datos presentados en la tabla 6.20.

Tabla 6.20: Dimensiones del digestor.

Volumen total (m ³)	400
Altura (m)	7
Diámetro (m)	8,5
Volumen efectivo (m ³)	340

6.3.3 Diseño de sistemas complementarios

Para el proceso completo de tratamiento de residuo y obtención del biogás se requiere establecer sistemas complementarios. Si bien la totalidad de los sistemas es amplia, en este apartado se seleccionaron algunos de los sistemas importantes. En la figura 6.17 se puede observar un esquema del proceso general y los sistemas seleccionados.

Almacenamiento

Conociendo los valores de residuos generados mensualmente, se pudo establecer una base de cálculo considerando la duración de cada mes y las cantidades generadas correspondientes (ver Tabla 6.21). Esto permitió determinar las generaciones de residuo durante el desarrollo de cada ciclo de tratamiento y estimar volúmenes aproximados que deberían almacenarse en esos periodos. Considerando además que se realizarían 4 lotes distintos y que cada ciclo tiene una duración de 29 días, la generación de residuos en el tiempo permitiría la acumulación según lo presentado en la Tabla 6.22.

Tabla 6.21: Generación de residuos durante meses de vendimia 2024. (Fuente: Viña Errázuriz).

Mes	Residuos mensuales generados (kg/mes)	Residuos diarios generados (kg/día)
Febrero	118.500	4.086
Marzo	267.980	8.645
Abril	331.430	11.048
Mayo	104.650	3.376

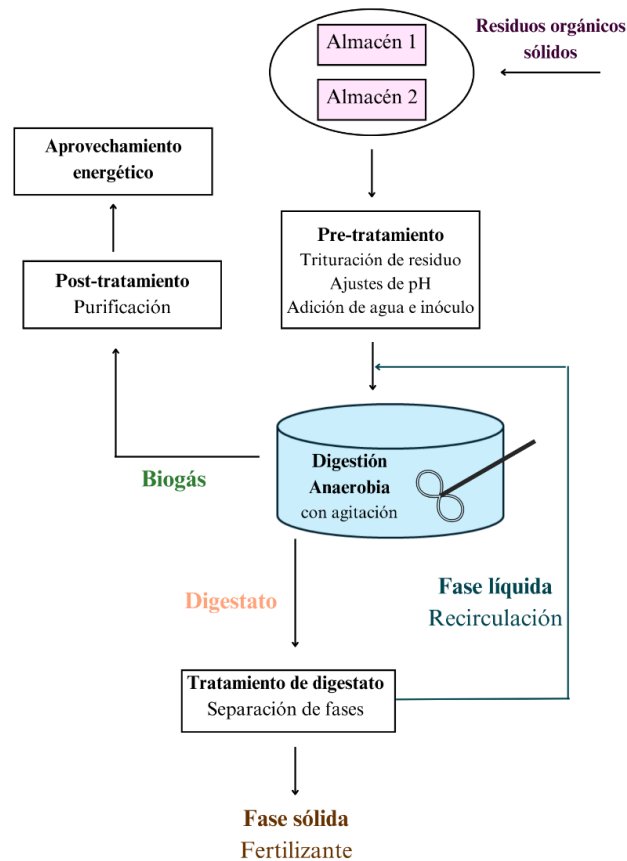


Figura 6.17.: Diagrama del proceso de digestión anaerobia del residuo, incluyendo sistemas complementarios.

Tabla 6.22: Generación y acumulación de residuos durante cada ciclo de digestión.

N° Lote	Periodo de generación	Cantidad generada de residuos (kg)	Cantidad de residuo ingresada al tratamiento (kg)	Cantidad de residuos remanente (kg)	Cantidad máxima de residuos acumulados (kg)
1	1 Febrero – Marzo 10	205.640	205.640	0	205.640
2	Marzo 11 – Abril 9	272.312	205.640	66.672	272.312
3	Abril 10 – Mayo 9	251.324	205.640	112.356	317.996
4	Mayo 10 – Junio 9	67.520	179.876	0	179.876

En la tabla 6.22 se pueden observar las cantidades generadas de residuos durante los periodos establecidos. Cada periodo presenta una cantidad generada diferente y tienen una duración de 29 días, ya que es el tiempo de duración de cada ciclo de tratamiento. Considerando esta

duración, la generación máxima de residuos ocurre en el periodo de marzo a abril. Sin embargo, la mayor acumulación de residuos se generaría en el periodo de abril a mayo, ya que además de almacenar lo generado en ese periodo, ya posee un valor acumulado restante del periodo anterior, por lo que el valor de 317.996 representaría la máxima cantidad de residuo que podría acumulado durante el desarrollo de un ciclo de digestión.

Utilizando este dato, es posible establecer las dimensiones de almacenamiento necesarias para mantener el residuo generado mientras las digestiones de los diferentes lotes ocurren. Si se contara con dos galpones (ver figura 6.18), cuyas dimensiones de largo, ancho y alto fueran 8x4x4 respectivamente, se podría almacenar un total de 320 kg de residuos. Se requeriría además de una superficie aproximada de 35 m².

Contar con dos galpones permitiría ajustarse a las amplias variaciones de generación de residuo entre los tiempos de digestión establecidos y también facilitaría la extracción de las cantidades acumuladas. Este sistema de almacenamiento de residuos debería contar con vías de ventilación para evitar la concentración de malos olores además de sistemas de cañerías recolectoras de lixiviados que puedan generarse durante el tiempo que transcurran acumulados entre digestiones.

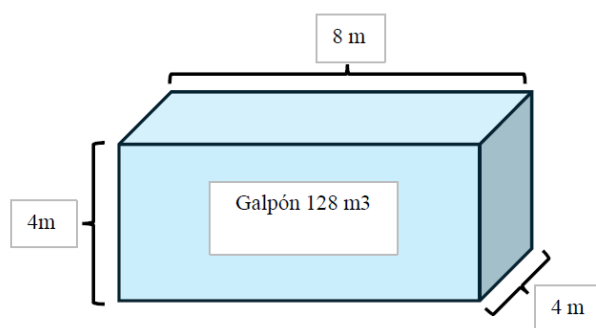


Figura 6.18.: Dimensiones de galpón de almacenamiento.

Pretratamiento

Previo al ingreso del residuo al proceso de digestión, es necesario ajustar todas sus características mencionadas en el capítulo 5.3. Para esto, se estableció una seguidilla de equipos como sistema de pretratamiento.

El residuo comenzaría ingresando a un equipo triturador industrial (ver figura 6.19) que puede tratar caudales de 2,5 t/h y tiene una potencia de motor de 4 kW para poder reducir el tamaño de sus partículas y luego ser transportado, mediante un sistema de cintas transportadoras, a un tanque de mezcla que posea en su interior un agitador y un sistema de control y monitoreo, para adicionar la cantidad establecida de inóculo y agua para ajustar la concentración de sólidos deseada, además de agregar los compuestos necesarios para el ajuste de pH del sustrato. Dado que se sabe que los valores de pH del residuo, por sí solo o con inóculo adicionado, no presentan números cercanos al rango neutro requerido para la digestión, lo ideal sería agregar compuestos como el Hidróxido de Calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) o Carbonato de Sodio (Na_2CO_3), sustancias básicas que son bastante recomendadas por ser económicas y seguras para los sistemas biológicos.

Una vez realizado el pretratamiento, un sistema de alimentación debería conectar la sección de pretratamiento con el digestor. Este sistema de alimentación va a requerir la ayuda de bombas, tuberías y válvulas para ser capaz de transportar el sustrato (con un 15% de sólidos).



Figura 6.19: Triturador Gamma Modelo TR 50. (Fuente: CME).

Agitación

Considerando lo descrito en el capítulo 4, el agitador seleccionado debe considerar múltiples características, principalmente el tipo de sustrato a mezclar, sus características y las dimensiones del digestor.

Considerando la siguiente información establecida:

- El sustrato posee un alto contenido de sólidos (15%). Es una mezcla de inóculo, agua y otras sustancias, cuyas proporciones fueron establecidas en el apartado anterior.
- La digestión anaerobia ocurre en un digestor discontinuo.
- El digestor posee un volumen de 400 m³, una altura de 7 m y un diámetro de 8,5 m.

Se opta por elegir un agitador del tipo mecánico, específicamente uno de paletas ya que son idóneos para sustratos con alto contenido de sólidos. El tipo de agitador seleccionado como el que se observa en la figura 6.20 sería utilizado horizontalmente, por lo que debería poseer una altura suficiente de al menos 6 metros de operación y poseen un ancho máximo de aplicación de 4,3 m por lo que se requeriría de dos equipos para el diámetro del digestor establecido. Estos equipos tienen una potencia de motor de hasta 15 kW y una velocidad máxima de 10 rpm.

El digestor puede contar con dos de estos agitadores, debido a que las dimensiones individuales del agitador no son suficientes para cubrir completamente el volumen interno del digestor. Se prevé que operen a una baja potencia ya que no se requiere de una agitación tan activa, por lo que podría incluso funcionar con una potencia menor a 5 kW.



Figura 6.20: Agitador agriKomp PADDELGIGANT. (Fuente: agrikomp).

Sistema de tratamiento de biogás

El biogás generado será transportado al sistema de postratamiento, cuya estructura y funcionamiento va a depender del porcentaje de compuestos problemáticos que contenga el biogás resultante y el uso que se le quiera dar. Para esto sería necesario contar con un caudalímetro que permita medir el caudal de biogás, su temperatura y el contenido de compuestos como el CH_4 y otros en menor cantidad.

Como se mencionó en el capítulo 4, existen diversas opciones de tratamientos, sin embargo, se optó por establecer un sistema general que permita purificar el biogás mediante la eliminación del agua. Esta purificación se puede realizar bajo el método de condensación del vapor de agua presente en el biogás, mediante la utilización de trampas de humedad que se instalan en las vías de extracción del producto, las que lo transportan y al mismo tiempo deben ser lo suficientemente inclinadas para permitir el condensado.

Sistema de tratamiento de digestato

Como fue explicado en el capítulo 4, existen diferentes tratamientos que pueden realizarse para adaptar el digestato según el uso que se le haya asignado, por lo que en esta sección se establecerá un sistema para el caso de utilizar el digestato como fertilizante en las viñas pertenecientes a la Viña Errazuriz.



Figura 6.21: Separador de fases Quetschprofi, agriKomp. (Fuente: agriKomp).

Siguiendo el método de separación de fases, se seleccionó el equipo observado en la figura 6.21, el cual permite obtener un digestato de hasta 30% de sólidos, tienen una potencia de motor de hasta 3 kW y un rango de velocidad de 24 a 37 rpm.

El almacenamiento de la fase sólida del digestato debe ser impermeable y también contar con un pequeño sistema de extracción y traslado del biogás residual que pueda generar almacenado, además de encontrarse protegido de las condiciones climáticas.

Con respecto a la fase líquida del digestato, luego de terminar el ciclo del primer lote, será recirculado y adicionado al sustrato, para beneficiar y agilizar el proceso de la digestión del próximo lote.

6.4 Resultados de análisis comparativo de utilización de biogás como sustituto energético

6.4.1 Consumo energético de la Viña Errázuriz

Se tuvo acceso al documento “Reporte control de gestión interno”, en el que se presenta una variedad de información respecto al funcionamiento interno de la Viña Errázuriz. Los datos relevantes al consumo energético son presentados según sector, los cuales se identifican a continuación:

- Planta Max Reserva: sector que envuelve las bodegas de vino Ícono, Max Reserva, Vino Blanco y Barricas. En estos sectores se lleva a cabo el proceso inicial de producción del vino y la fermentación.
- Planta Panquehue: sector antiguo de la Viña Errázuriz que comprende la bodega antigua de enología, producción, envasado de productos, laboratorio, marketing, oficinas administrativas, etc.
- Planta Riles: envuelve el sector separado de la planta productiva de la viña donde se ubica la planta de tratamiento de residuos industriales líquidos provenientes de los procesos de producción del vino.

Para efectos de este trabajo, se consideraron solamente los consumos de los sectores de Max Reserva y Planta Panquehue. Los consumos respectivos se presentan a continuación.

Consumo de electricidad

El consumo eléctrico proviene principalmente de la red eléctrica Chilquinta la cual alimenta a todos los equipos, maquinarias e instalaciones presentes en la planta. Los medidores son identificados según la ubicación en la que se encuentran, como Max Reserva, Planta Panquehue y Planta Riles. En la tabla 6.23 se observan los consumos eléctricos de los medidores ubicados en Maz Reserva y Planta Panquehue.

Tabla 6.23: Consumo de electricidad en la Viña Errázuriz.

Mes	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Total
Consumo en Max Reserva (kWh)	186.336	258.011	196.782	136.010	64.285	35.881	1.063.640
Consumo en Planta Panquehue (kWh)	231.705	227.207	181.051	144.693	110.476	120.617	1.236.686

Consumo de petróleo

Debido a que en la estación de invierno Chilquinta establece un periodo de hora punta desde las 18:00 hasta las 22:00 horas por un periodo definido que varía cada año, en donde los precios de consumo aumentan su valor, se utilizan los grupos electrógenos que reemplazan el suministro de electricidad del tendido eléctrico. Estos generadores se abastecen de petróleo y también sirven para abastecer a la planta frente a cortes de electricidad imprevistos.

Tabla 6.24: Consumo de petróleo en la Viña Errázuriz.

Mes	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto
Consumo (L)	3.000	9.894	13.274	4.064	2.419	2.571

Consumo de gas licuado

Dentro de la viña existen tres puntos de almacenamiento de gas, los cuales se identifican como “gas grúa” y “gas granel”. Los estanques conocidos como “gas grúa” tiene un sistema de auto gas y se encuentran en el sector Max Reserva y Planta Panquehue. Este punto de almacenamiento lleva ese nombre debido a que se utiliza únicamente para cargar las grúas horquillas. Por otro lado, el punto de almacenamiento “gas granel” se encuentra en el sector de Max Reserva y es utilizado para alimentar las calderas que abastecen el sistema productivo de agua caliente además de entregar el mismo recurso al casino y baños.

Tabla 6.25: Consumo de gas licuado en la Viña Errázuriz.

Mes	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto
Consumo (L)	17.200	20.900	23.300	17.200	13.700	16.500

6.4.2 Características de biogás producido

Para calcular el biogás generado a gran escala se utilizó el valor PBM promedio de las muestras M4, las cuales presentaron una mayor producción en comparación a las otras muestras y cuyos parámetros fueron utilizados para dimensionar el digestor. Con estos valores establecidos y asumiendo que el contenido de metano en el biogás alcanza un 70%, la cantidad posible de producción de biogás por cada lote, según la ecuación 5.10, sería:

$$\text{Volúmen de CH}_4 = 0,3793 \frac{\text{m}^3 \text{ de CH}_4}{\text{kg SVs}} * 205.640 \text{ kg residuo} * 0,8 \frac{\text{kg de SV}}{\text{kg de residuo}} = 62.387 \text{ m}^3$$

Por lo tanto, se podrían producir aproximadamente 62.387 m³ de metano por cada lote de alimentación.

6.4.3 Selección de utilización de biogás

Con los datos obtenidos en los apartados anteriores, se seleccionó trabajar con las calderas que funcionan con gas licuado de petróleo. Las razones para seleccionar este sector se presentan a continuación.

- Consumo acorde: el consumo de gas licuado aumenta considerablemente durante los meses de vendimia. Si fuera reemplazado por el biogás generado, el consumo sería instantáneo y proporcional a la generación en el tiempo.
- Facilidad de acondicionamiento: dado que la Viña Errázuriz ya cuenta con calderas, los costos asociados a la adaptación de estos equipos para consumir biogás serían menores en comparación a los costos relacionados a comprar equipamientos nuevos para generación eléctrica. Además, el acondicionamiento de calderas para calefacción de agua suele ser el uso más simple de biogás, ya que solo requiere ajustar los inyectores de los quemadores.
- Reducción de emisiones asociadas: al sustituir el uso de gas licuado de petróleo, el cual es un combustible fósil, provoca una reducción indirecta de emisiones de CO₂ asociadas a la extracción, producción y consumo de este tipo de combustibles, lo que contribuye a mejorar las condiciones ambientales atmosféricas.

6.4.4 Situación actual de calderas

Actualmente la Viña Errázuriz cuenta con 7 calderas que funcionan con gas licuado de petróleo y una con biomasa de madera. Estas se emplean solamente para calentar corrientes de agua que se utilizan en los procesos productivos dentro de la planta. A continuación, se presenta una recopilación de la información más relevante sobre las calderas.

El consumo de cada caldera se encuentra expresado en m³ nominal por hora, es el consumo promedio anual de la caldera asociado a las horas de funcionamiento durante los meses de funcionamiento. En la tabla 6.27 se presenta información respecto a los tiempos de funcionamiento de cada caldera.

Tabla 6.26: Consumo de calderas y emisiones asociadas. (Fuente: Viña Errazuriz).

Fuente	Nombre	Consumo (Nm³/h)
CA-OR-12470	Caldera UNICALL ELL 760	14,517
CA-OR-12480	Caldera UNICALL ELL 340	10,293
CA-OR-35769	Caldera 01	5,069
CA-OR-35770	Caldera 02	2,656
CA-OR-35771	Caldera 03	12,309
CA-OR-35772	Caldera 04	1,109
CA-OR-46977	Caldera UNICALL ELL 420	63,414

Tabla 6.27 Tiempos de funcionamiento de cada caldera. (Fuente: Viña Errazuriz).

Fuente	Periodos de funcionamiento	Tiempo de funcionamiento semanal (h)	Tiempo de funcionamiento mensual (h)
CA-OR-12470	23 de Marzo – 23 de Junio	12,167	52,14
CA-OR-12480	23 de Abril – 23 de Junio	20,55	88,07
CA-OR-35769	23 de Marzo – 23 de Junio	9,43	40,41
CA-OR-35770	23 de Marzo – 23 de Junio	22,13	94,84
CA-OR-35771	23 de Enero – 23 de Diciembre	11,53	49,41
CA-OR-35772	23 de Abril – 23 de Junio	4,8	20,57
CA-OR-46977	23 de Enero – 23 de Diciembre	6,52	27,94

6.4.5 Situación con utilización de biogás

Para establecer esta nueva situación cabe explicar que se buscaría evaluar si las cantidades producidas de biogás, bajo sus condiciones y características, podrían cubrir las necesidades de cada caldera de acuerdo a sus respectivos consumos.

Para esto se consideró realizar los cálculos considerando el poder calorífico del biogás y del gas licuado de petróleo ya que este parámetro permite establecer la cantidad de calor desprendido durante la combustión completa de un volumen establecido del gas en condiciones normales de presión y temperatura (0°C y 1 atm). Entonces, utilizando estos datos sería posible establecer una relación entre el gas licuado y el biogás.

En diferentes fuentes bibliográficas los valores del poder calorífico de estos gases eran algo diferentes, tanto en unidades como en magnitud, por lo que para realizar estos cálculos se estableció trabajar con un poder calorífico de:

- Gas licuado: un valor de 23.230 kcal/m³ establecido en una Norma Oficial Mexicana NOM-Q-27-1986 “Calentadores para agua tipo almacenamiento a base de gas natural o gas licuado de petróleo”.
- Biogás: un valor de 5.500 kcal/m³, asociado a biogás con al menos 70% de CH₄ (Moncayo, 2017).

Definidos estos valores y utilizando la ecuación 5.11, se estableció la cantidad necesaria de kilocalorías de gas licuado para cubrir el consumo de cada caldera (kcal/h) y con este valor obtenido y el poder calorífico del biogás se calculó la cantidad necesaria de metano (m³) para alcanzar esas dichas kilocalorías en el tiempo determinado. Estos resultados se presentan en la tabla 6.28.

Obtenido el consumo de biogás de cada caldera, se utilizó la información presentada en la tabla 6.27 con los tiempos de funcionamiento específicos y el resultado obtenido se presenta en la tabla 6.29.

Tabla 6.28: Consumo aproximado de biogás de cada caldera.

Nombre	Consumo de GLP (Nm ³ /h)	Calor requerido para 1 L de agua (kcal/h)	Consumo de biogás (m ³ /h)
Caldera UNICALL ELL 760	14,517	337229,91	61,31452909
Caldera UNICALL ELL 340	10,293	239106,39	43,47388909
Caldera 01	5,069	117752,87	21,40961273
Caldera 02	2,656	61698,88	11,21797818
Caldera 03	12,309	285938,07	51,98874
Caldera 04	1,109	25762,07	4,684012727
Caldera 05	63,414	1473107,22	267,8376764

Tabla 6.29: Consumo mensual requerido por cada caldera.

Equipo	Biogás requerido mensual (m ³)
CA-OR-12470	3196,94
CA-OR-12480	3828,75
CA-OR-35769	865,16
CA-OR-35770	1063,91
CA-OR-35771	2568,76
CA-OR-35772	96,35
CA-OR-46977	7483,38
Total	71.299,5

Comparando los requerimientos determinados con la cantidad de biogás generada por cada lote, se puede mencionar lo siguiente:

- Los tiempos de funcionamiento de las calderas llega a coincidir casi perfectamente con los ciclos de cada lote de digestión, ya que las calderas comienzan a funcionar aproximadamente para el 23 de marzo, fecha por la cual ya habría finalizado el primer lote de digestión e iniciado el segundo.
- Si se consideran solo aquellas calderas que funcionan durante los meses de vendimia, las cantidades generadas de biogás por cada lote alcanzarían a cubrir la demanda según los cálculos realizados.

Suponiendo que el biogás luego de ser purificado y pasar por el sistema de tratamiento con éxito, las cantidades de metano podrían ser mayores lo que aumentarían la eficiencia de la utilización. Además, un buen acondicionamiento de las calderas, como la adición de protección anticorrosión o de sistemas reguladores y de control de combustión, podrían asegurar un mejor aprovechamiento del biogás.

7. Discusión

7.1 Sobre cuantificación y caracterización del sustrato

Martínez el 2019 presentó una tabla donde reunió datos de diferentes fuentes bibliográficas, donde presenta que el orujo como residuo orgánico posee valores similares a los reportados en este trabajo, como el pH ácido, una relación C/N cercana a 20 y contenidos bajos de nitrógeno.

Dado que el residuo es una mezcla de orujo y escobajo, podría estudiarse a detalle la proporción de estos compuestos en el residuo y las características de estos, lo que permitiría especificar sus propiedades y adecuar mejor las variables para el desarrollo del ensayo PBM. Además, si en un futuro se buscara instalar la digestión anaerobia como tratamiento en la Viña Errázuriz, podría evaluarse la necesidad de segregar los residuos orgánicos sólidos generados.

7.2 Sobre resultados de ensayo PBM y cálculos de productividad

Ya que el inóculo utilizado presentó una relación C/N bastante cercana a la del residuo, el rango establecido para trabajar y definir las diferentes cantidades de mezcla para cada muestra fue bastante corto (17 – 20). Este rango pudo haberse ampliado con la utilización de otro sustrato estándar o conocido que aportara carbono.

Respecto al sistema de medición construido, cabe mencionar que, si bien permitió medir las cantidades de una manera simple y rápida, los valores medidos no fueron 100% exactos, por lo que haber utilizado un método diferente de medición, como un cromatógrafo de gases, pudo haber entregado datos más exactos además de otro tipo de información, como la composición del biogás.

Respecto a los valores de PBM obtenidos, algunos autores también reportan resultados, como Indiveri (2022), la cual realizó el ensayo utilizando orujo agotado de uva como sustrato y mediante el cual obtuvo un valor de 37,52 L CH₄/ kg SV. Martínez y otros autores, el 2016, obtuvieron un valor de 113 L CH₄/kg SV también utilizando orujo. Considerando los resultados obtenidos en este trabajo, la diferencia de valores podría deberse principalmente a la composición del sustrato utilizado y sus características.

Sería interesante investigar si la utilización del inóculo seleccionado presenta una inhibición de la producción del biogás al mezclarse con el residuo. Esto podría concluirse debido al hecho de que aquellas muestras con menos cantidad de inóculo presentaron una mayor producción, sin embargo, no sería una afirmación correcta ya que no hay manera de demostrar que este efecto está realmente asociado a la presencia del inóculo o a otro factor, al menos no en el enfoque que se desarrolló en este trabajo.

Si bien los duplicados que solo contenían residuo no fueron abordados en los resultados, presentaron una generación de biogás considerable y demostraron que el residuo por sí solo es un sustrato apto para la generación de biogás. Dados estos resultados se podría mencionar lo siguiente:

- La generación de biogás en los reactores que solo contenían residuo presentó la mayor producción de biogás en comparación con los otros reactores, esto puede ser a causa de que el residuo en sí posee un PBM mayor. Para probar esta hipótesis podría estudiarse el residuo por sí solo y buscar la manera de estabilizarlo con tal de eliminar cualquier elemento que pueda alterar los resultados del desarrollo del ensayo PBM.
- Otra explicación para la alta generación de biogás podría ser debido al pH neutro alcanzado en el pretratamiento. Por lo tanto, también sería de interés trabajar a fondo con el residuo por sí solo, ajustando la variable pH y evaluando su respuesta.

Con respecto a la productividad alcanzada, es notable que a lo largo de la duración del ensayo la generación de biogás fue significativa sólo durante los primeros 10 días, por lo que sería interesante repetir ensayos limitando los tiempos de duración para evaluar las producciones y así poder establecer si realmente un ciclo de digestión a gran escala no requiera de largas duraciones para obtener la mayor cantidad de biogás.

Cabe mencionar que el punto establecido para calcular la productividad fue en el día 7 ya que la mayoría de las muestras presentaban una producción al siguiente periodo menor al 10%, excepto una muestra la cual presentaría un 12% (M4 – C). A pesar de no cumplir el criterio establecido, el valor que presentaba se encuentra cercano por lo que igualmente se utilizó el valor para calcular la productividad en ese punto.

Por otro lado, respecto a los resultados estadísticos, el que la relación C/N y la concentración de sólidos hayan resultado significativos corrobora la información obtenida de diferentes fuentes bibliográficas que sugieren a estos factores como relevantes en el desarrollo del ensayo PBM.

Con respecto a los resultados obtenidos sobre la composición del digestato se puede mencionar lo siguiente:

- Si bien los resultados permitieron establecer que el digestato en efecto posee los compuestos NPK, la cantidad exacta no se pudo determinar por no poseer acceso a un instrumento específico y porque las cantidades resultantes de cada muestra no fueron suficientes para ser enviadas a un laboratorio analítico.

El no contar con esta información, la cual está estrictamente ligada al tipo de sustrato utilizado, imposibilitó compararlo con fertilizantes comerciales o asociarlo, por ejemplo, a lo establecido en la resolución que indica contenidos mínimos de elementos nutricionales y contenidos máximos de elementos contaminantes en fertilizantes y bioestimulantes.

- Sería interesante estudiar este digestato de una manera completa para identificar los porcentajes de composición específicos y las cantidades que presenta utilizando un método cuantitativo.

Uno de los factores que pudieron afectar el ensayo es la pequeña variación de pH en cada una de las muestras, ya que al adicionar la solución utilizada se alcanzaban valores básicos al inicio, pero con el paso de los minutos decaía constantemente, lo que complicó poder ajustar los valores de pH y resultó en tener varias muestras de la misma composición con pH ligeramente diferentes. Podría ser interesante igualmente estudiar el efecto de estas ligeras variaciones de pH en el potencial de generación de biogás del residuo.

7.3 Sobre el diseño del digestor anaerobio y sus complementos

Al momento de diseñar el sistema de gestión del biogás, la principal problemática encontrada fue no haber definido previamente un uso para la utilización del biogás producido, sin embargo se optó por seleccionar un sistema simple y básico que asegurara un tratamiento general para el biogás. Por lo tanto, si se llegara a definir previamente el uso del biogás producido, el sistema de tratamiento podría ser diseñado de una manera específica con tal de lograr el producto requerido.

Uno de los sistemas adicionales mas relevantes es el sistema para el control de temperaturas. Dado que en reactores grandes donde se lleva a cabo la digestión se liberan cantidades de calor considerables durante el desarrollo del proceso, por lo que es importante contar con mecanismos que permitan regular y estabilizar las temperaturas. En el caso del presente trabajo no se desarrolló este tipo de sistema complementario, por lo que sería recomendable diseñarlo considerando igualmente las condiciones desarrolladas durante la temporada de vendimia, como las climáticas.

7.4 Sobre la utilización de biogás como reemplazo energético

Si bien los valores obtenidos están calculados para un porcentaje de 70% de CH₄ en el biogás producido, estos no consideran el incremento considerable en el porcentaje de metano que otorga el tratamiento del biogás. Por lo tanto, al no contar con datos específicos de la composición del biogás se optó por elegir un porcentaje común, ampliamente establecido en la bibliografía disponible.

Debido a la escasa bibliografía específica sobre los valores de poder calorífico, tanto del biogás como del gas licuado, se dificultó el desarrollo de este objetivo. Los cálculos realizados ya no involucraban valores específicos relacionados al residuo, solamente se utilizó la cantidad de biogás generada por lote.

Ya que el biogás y su composición dependen completamente del residuo utilizado y sus características, una posible línea de estudio sería caracterizar el biogás generado de la digestión de orujo y definir así su poder calorífico. Esto también incrementaría la información respecto a los poderes caloríficos de residuos de la agroindustria y también ampliaría la escasa bibliografía disponible sobre el tratamiento del orujo mediante la digestión anaerobia.

Haber conocido el consumo eléctrico de la planta de biogás de una manera más detallada, específicamente de todos los sistemas y equipos utilizados en el proceso, habría permitido evaluar la posibilidad de utilizar el biogás generado para energizar la planta y el proceso entero, además de establecer si hubiera un excedente que pudiera utilizarse en otro sector energético de la viña.

8. Conclusión

A través de este trabajo de investigación, se logró diseñar un digestor anaerobio para poder valorizar energéticamente a los residuos orgánicos sólidos generados en la Viña Errázuriz cada año durante la temporada de vendimia.

En primer lugar, la cuantificación y caracterización del residuo permitieron determinar su generación estacional y algunas propiedades, como el pH, el contenido de sólidos totales y la relación C/N, valores que luego fueron utilizados para establecer condiciones de trabajo y realizar con éxito el ensayo PBM. Los resultados de esta prueba verificaron que el residuo, bajo las condiciones de tratamiento de la digestión anaerobia, puede producir biogás. Estos resultados amplían la poca información disponible sobre valores experimentales relacionados al PBM del orujo como sustrato.

Toda la información obtenida fue esencial para diseñar el digestor anaerobio. Las dimensiones calculadas podrían tratar mensualmente cantidades considerables de residuos durante la temporada de vendimia y el biogás producido puede cubrir el consumo energético de al menos 5 calderas de las 6 que funcionan solo durante este periodo, lo que eliminaría costos asociados a la compra de GLP a granel y a la gestión actual del residuo, sin embargo, se sumarían los gastos asociados al funcionamiento del digestor y todos sus sistemas complementarios.

A pesar de no haber podido definir el potencial fertilizante del digestato, se comprobó que contenía nutrientes beneficiosos para los suelos, por lo tanto, sería útil determinar la composición del digestato y sus beneficios respecto a la aplicación de estos en los suelos de campos vinícolas chilenos y así el orujo que una vez fue residuo pueda ser utilizado para beneficiar el desarrollo de las vides y cumplir un ciclo de reutilización total.

En conclusión, la valorización energética del residuo mediante la digestión anaerobia se presenta como una herramienta posible y eficaz para gestionar la generación del orujo en la Viña Errázuriz.

9. Bibliografía

AINIA y GIRO. (2011). Situación y potencial de generación de biogás. [Archivo PDF].

https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_11227_e16_biogas_db43a675.pdf

Araya, C. (2017). Determinación del potencial metanogénico del bagazo cervecero, para su valorización energético en una cervecería artesanal modelo. [Título de Ingeniero Ambiental, Universidad de Valparaíso].

Bachmann, N. (2013). Design and engineering of biogas plants. En Vellinger, A., Murphy, J. y Baxter, D (ED). *THE BIOGAS HANDBOOK Science, production and applications* (pp. 191-211). Woodhead Publishing Limited.

Bentley, Johanna. (2012). Modeling a solar-heated anaerobic digester for the developing world using system dynamics. [Grado de Maestría de Science in Sustainable Engineering, Rochester Institute of Technology].

Bennardi, D., (2021). Digestión anaeróbica: obtención de biogás. [Archivo PDF].

https://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/95628/mod_resource/content/1/Apunte%20sobre%20digesti%C3%B3n%20anaer%C3%B3bica%20y%20biog%C3%A1s%20_Edici%C3%B3n%202021_.pdf

Bertolotto, A. (2020) Diseño y evaluación de un modelo de negocio para la producción de etiquetas y cajas de vino a partir del desecho orgánico-vinífero. Memoria para optar al Título de Ingeniera Civil Industrial. Santiago, Chile. Universidad de Chile, 2020. 124p.

Bolaños, A. & Sandoval, L. (2022). Evaluación de la influencia de métodos volumétricos y manométricos sobre la cuantificación de biogás/metano en la biodegradabilidad anaerobia de la celulosa [Trabajo de grado, Universidad del Valle].

<https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/server/api/core/bitstreams/dcdbca4b-1aaa-4fe3-97be-cfc03abe3c4d/content>

Bres, Patricia, Beily, Maria y Crespo, Diana (2022). Ensayo de potencial bioquímico metanogénico: una metodología clave para conocer la energía de las biomasas. INTA.

https://www.researchgate.net/publication/359231717_Ensayo_potencial_bioquimico_metanogenico_Una_metodologia_clave_para_conocer_la_energia_de_las_biomasas

Campos, Bernardo (2011). Metodología para determinar los parámetros de diseño y construcción de biodigestores para el sector cooperativo y campesino. *Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 20 (2), pp. 37-41.

Campos, E., Illa, J., Magri, A., Palatsi, J., Solé, F. y Flotats, X. (2004). Guía de los tratamientos de las deyecciones ganaderas. [Archivo PDF]

http://www.arc-cat.net/es/altres/purins/guia/pdf/guia_dejeccions.pdf

Cardenas Cleves, Lina & Parra, Brayan & Torres Lozada, Patricia & Vásquez, Carlos. Perspectivas del ensayo de Potencial Bioquímico de Metano - PBM para el control del proceso de digestión anaerobia de residuos. *Revista Investigación, Optimización y Nuevos procesos en Ingeniería*, 29. (2016), pp. 95-108.

Claude & Fruteau, Helene & Ghasimi, Dara & Hack, Gabrielle & Hartel, Mathias & Wierinck, I. (2016). Towards a standardization of biomethane potential tests. *Water Science & Technology*. 74 (11), pp. 2515-2522.

Comisión Nacional de Energía. (2007). Identificación y clasificación de los distintos tipos de biomasa disponibles en Chile para la generación de biogás. [Archivo PDF].

https://energypedia.info/images/d/dc/Potencial_Biogas_Chile.pdf

Deublein, D., & Steinhauser, A. (2008). *Biogas from waste and renewable resources*. Strauss, Alemania: Wiley-VCH.

Fernández, C. (2018). Análisis técnico económico para instalación de planta de biogás utilizando residuos vitivinícolas para generación de energía en la Región del Maule. [Título de Ingeniera Civil Industrial, Universidad Técnica Federico Santa María].

Fernández, A. (2022). Diseño de una planta de biogás. [Título en Ingeniería en Sistemas Industriales, Universidad Europea Madrid].

García, E. (2017) Diseño de un digestor para una planta de biogás agroindustrial [Grado de Ingeniería Civil, Universidad de Cantabria].

<https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/11909/Elordi%20Garc%C3%ADa%20Lucas.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

González, C. (2023). Análisis técnico de la factibilidad de generación de biogás a partir de los residuos orgánicos generados en el Centro Integral de Atención al Estudiante Universidad de Valparaíso. [Título de Ingeniera Ambiental, Universidad de Valparaíso].

González, R. (2023). *Clasificación de Plantas de Biogás*. Documento divulgativo N° 15 (1-1-2023)

https://www.researchgate.net/publication/376830605_Clasificacion_de_Plantas_de_Biogas_-_Doc_Divulg_15_1-1-2024

Gutiérrez, H. (12 de marzo de 2024). Exportación de vino chileno cayó 20,7% en 2023: 50 viñas contraatacarán en feria ProWein.

<https://www.eldesconcierto.cl/nacional/2024/03/12/exportacion-de-vino-chileno-cayo-207-en-2023-50-vinas-contraatacaran-en-feria-prowein.html#:~:text=A%20lo%20largo%20de%202023,datos%20de%20Wines%20of%20Chile>

Hernández, T. (4 de junio de 2021). Viñedos sustentables: cuidando al medio ambiente y a los consumidores.

<https://www.elmostrador.cl/generacion-m/2021/06/04/vinedos-sustentables-cuidando-al-medio-ambiente-y-a-los-consumidores/>

I. Angelidaki, M. Alves, D. Bolzonella, L. Borzacconi, J. L. Campos, A. J. Guwy, S. Kalyuzhnyi, P. Jenicek y J. B. van Lier (2009). Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays. *Water Science & Technology*, 59 (5), pp. 927-934.

IDAE (2007). Biomasa: Digestores anaerobios. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía.

https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10737_Biomasa_Digestores_Anaerobios_A2007_0d62926d.pdf

Indiveri, M. (2022). Digestión anaerobia de orujo de uva de bodegas de la provincia de Mendoza. [Magister Ingeniería Ambiental, Universidad Nacional de Cuyo].

Instituto Nacional de Estadísticas de Chile. (2024). Boletín Trimestral del Vino. [Archivo PDF].

https://regiones.ine.gob.cl/documentos/default-source/region-vi/estadisticas/vitivinicultura/boletines/2024/boletin-vino---1er-trimestre-2024.pdf?sfvrsn=d73ba736_4

Kannan, Akil & Singaram, Jayanthi. (2012). Anaerobic sequencing batch reactors and its influencing factors: an overview. *Journal of environmental science & engineering*. 54. P: 317-22.

López-Astorga, M., Molina-Domínguez, C. C., Ovando-Martínez, M., & Leon-Bejarano, M. (2022). Orujo de Uva: Más que un Residuo, una Fuente de Compuestos Bioactivos. *EPISTEMUS*, 16(33).

<https://doi.org/10.36790/epistemus.v16i33.283>

Mapeko. (20 de agosto de 2022). Residuos Orgánicos en Chile.

https://mapeko.org/recursos/residuos-organicos-en-chile-2/#Gestion_y_manejo_de_residuos_organicos

Marildo Guerini Filho, Marluce Lumi, Camila Hasan, Munique Marder, Letícia C.S. Leite, Odorico Konrad (2018). Energy recovery from wine sector wastes: A study about the biogas generation potential in a vineyard from Rio Grande do Sul, Brazil. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 29 (2018), pp. 44-49.

Ministerio de Energía. (2012). Guía de Planificación para Proyectos de Biogás en Chile. [Archivo PDF].

<https://biogaslechero.minenergia.cl/wp-content/uploads/2015/12/guiaplanificacionproyectosbiogasweb.pdf>

Ministerio de Energía. (2017). Proyecto Planta de Biogás Molina, Viña San Pedro. https://autoconsumo.minenergia.cl/?proyect_autoconsumo=planta-de-biogas-molina-vina-pan-pedro

Ministerio de Energía. (2020). Registro de plantas de biogás. [Archivo PDF].

https://autoconsumo.minenergia.cl/wp-content/uploads/2017/08/Registro-Plantas-Bioga%CC%81s-web_MARZO-2020.pdf

Ministerio de Energía. (2021). Mapa normativo del sector chileno. [Archivo PDF].

https://energia.gob.cl/sites/default/files/mapeo_normativa_energetica_2021.pdf

Ministerio del Medio Ambiente. (2022). Economía circular y residuos orgánicos. <https://economiacircular.mma.gob.cl/residuos-organicos/>

Ministerio del Medio Ambiente. (2022). Ley marco 20.920 para la gestión de residuos. <https://economiacircular.mma.gob.cl/ley-rep/>

Ministerio del Medio Ambiente. (2023). Reporte del Estado del Medio Ambiente 2023. <https://sinia.mma.gob.cl/estado-del-medio-ambiente/reporte-del-estado-del-medio-ambiente-2023/>

Mettler Toledo. (12 de junio 2023). Medición de la densidad con balanza de laboratorio.

https://www.mt.com/es/es/home/applications/Laboratory_weighing/density-measurement.html

Nishat Khan, Adil Shafi Ganie, Abdul Hakeem Anwer, Mohammad Zain Khan, Mohammed M. Rahman. Capítulo 7, Bioremediation of chlorophenols for the production of biogas: A green alternative, Jastin Samuel, Ajay Kumar, Joginder Singh. Relationship Between Microbes and the Environment for Sustainable Ecosystem Services, Elsevier (2023). Pages 117-133.

Procycla. (2021). Residuos Orgánicos. <https://procycla.cl/gestion-de-residuos-organicos/>

Reinecke, Gerhard & Torres, Nicolás. La industria vitivinícola en Chile: el enfoque de las cadenas mundiales de suministro para el análisis y la mejora del cumplimiento normativo en el mundo del trabajo. Primera Edición. Chile, Informes Técnicos OIT Cono Sur, 2023. 57p.

Rani, J.; Indrajee, Y.; Rautela, A.; Kumar, S. Capítulo 4, Biovalorization of winery industry waste to produce value-added products. en “Biovalorisation of Wastes to Renewable Chemicals and Biofuels”; Rathinam, N.K., Sani, R.K., Eds.; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2020; pp. 63–85. ISBN 9780128179512.

Ríos, I. & Peñaloza, P. (2015). Estimación del potencial metanogénico de lodos provenientes de una piscícola de salmónes. [Título de Ingeniero Ambiental, Universidad de Valparaíso].

Ruiz, J. et al. (2009). II Congreso Latinoamericano de Bio-refinerías Materuales y energía: Biogás en Chile. [Archivo PDF].

https://www.biorrefinerias.cl/wp-content/uploads/2017/12/CNE_J.A_Ruiz.pdf

Sáez, Asier. Valorización de residuos de la vinificación: semillas de uva como fuente de productos de interés para la industria alimentaria. Grado en Ciencia y Tecnología de los Alimentos. Lejona, España. Universidad del País Vasco, 2022. 28p.

Servicio Agrícola y Ganadero. (2023). Informe Final: Producción de Vinos 2023. [Archivo PDF].

<https://www.sag.gob.cl/sites/default/files/Informe%20Final%20Cosecha%202023.pdf>

Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo (2018). Diagnóstico de la situación por comuna y por región en materia de RSD y asimilables.

https://www.subdere.gov.cl/sites/default/files/2_marco_legal_agosto_2018.pdf

Superintendencia de Electricidad y Combustibles. (2019). Biogás.

<https://www.sec.cl/gda/biogas/#1568059676579-d5184c9d-24cd>

Tasneem Abbasi, S.A. Abbasi. Formation and impact of granules in fostering clean energy production and wastewater treatment in upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactors. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Volume 16, Issue 3,2012, Pages 1696-1708.

Types of Anaerobic Digesters. BRISTOLA. <https://bristola2.com/blog/types-of-anaerobic-digesters/>

Uriel, Alicia. Estudio sobre el aprovechamiento de residuos de la industria vinícola. Grado en Ciencia y Tecnología de los Alimentos. Zaragoza, España. Universiada de Zaragoza, 2019. 43p.

Varnero, M. (2011). Manual del Biogás. [Archivo PDF].

https://www.energia.gob.cl/sites/default/files/manual_de_biogas.pdf

Viña Concha y Toro. (17 de mayo de 2018). Viña concha y toro recicla y reutiliza el 100% de sus residuos industriales. <https://vinacyt.com/noticia/sustentabilidad/vina-concha-y-toro-recicla-y-reutiliza-el-100-de-sus-residuos-industriales/>

Wineverso. (11 de noviembre de 2023). ¿Cuánta cantidad de uva se necesita para hacer un vino?. <https://www.wine.com.mx/blogs/curiosidades-del-vino/cuanta-cantidad-de-uva-se-necesita-para-hacer-un-vino#:~:text=Aunque%20algunas%20producciones%20caseras%20incluyen,3%20a%201%2C5%20kilos>

Wines of Chile. (2023). Regiones Vitivinícolas. <https://www.winesofchile.org/es/winegrowing-regions/>

8. ANEXOS

8.1 Ingresos anuales de uva registrados hasta la fecha.

Año de cosecha	Uva recibida (kg)
2012	19.824.497
2013	23.600.829
2014	16.917.635
2015	20.070.642
2016	19.629.436
2017	15.378.122
2018	13.890.131
2019	13.025.217
2020	12.024.683
2021	13.568.036
2022	10.920.798
2023	13.654.778
2024	11.929.338

8.2 Cálculos de Sólidos Totales de residuo orgánico sólido

Réplica 1			
	pms =	28,4237	
	pcs =	25,6361	
	pmh =	34,1675	
	ST=	$\frac{28,4237 - 25,6361}{34,1675 - 25,6361}$	
	ST =	0,3267459	

8.3 Cálculos de sólidos volátiles de residuo orgánico sólido

Réplica 1			
	ps =	2,7876	
	pc=	0,5086	
	SV =	$\frac{2,7876 - 0,5086}{2,7876}$	
	SV=	0,81754915	

8.4 Datos experimentales de la determinación de sólidos totales del residuo

Réplica	Peso crisol seco (pcs) (g)	Peso muestra húmeda (pmh) (g)	Peso muestra seca (pms) (g)
1	25,6361	34,1675	28,4237
2	24,1110	33,7334	27,2887
3	23,2925	34,0078	26,9687
4	23,5672	34,0960	27,2127
5	24,2291	35,4885	27,9606
6	23,3002	34,0100	26,8286

Réplica	1	2	3	4	5	6
ST (g/g)	0,3267	0,3302	0,3431	0,3462	0,3434	0,3294
Promedio (g/g)	0,3365					
Desviación Estándar	0,008619					

8.5 Datos experimentales de la determinación de solidos volátiles del residuo

Réplica	Peso muestra calcinada (g) (pc)	Peso muestra seca (g) (ps)
1	0,5086	2,7876
2	0,6209	3,1777
3	0,7317	3,6762
4	0,6782	3,6455
5	0,7461	3,7315
6	0,6598	3,5284

Réplica	1	2	3	4	5	6
SV (g/g)	0,8175	0,8046	0,8009	0,8139	0,8000	0,8130
Promedio (g/g)	0,808316667					
Desviación Estándar	0,007421972					

8.7 Promedio de mediciones experimentales de la determinación del pH

Réplica	pH
Muestra 20 gr	4,3
Muestra 40 gr	4,4

8.6 Datos experimentales de la determinación de la humedad del residuo

Réplica	Peso residuo (g)	Tiempo de secado (min)	Contenido de humedad (%)
1	10,35	41	72,6
2	10,31	43	70,1
Promedio (%)	71,35		
Desviación Estándar	1,76776695		

8.8 Datos experimentales de la determinación de la humedad del inóculo

Réplica	Peso residuo (g)	Tiempo de secado (min)	Contenido de humedad (%)
1	10,1	73	82,3
2	10,48	75	85,2
3	10,1	76	80,4
Promedio (%)	82,63333333		
Desviación Estándar	2,417298768		

8.9 Hojas de cálculos para determinación de cantidades de sustrato e inóculo según relación C/N y % de sólidos

	ST(%) (b.h)	N(%) (b.s)	C/N
Residuo Orgánico	33,65	2,14	20,2
Estiercol Vacuno	15	2,2	17,2

[sólidos] % (p/v)	15
Volumen total ensayo (mL)	100
Volumen headspace (mL)	22
Volumen útil (mL)	100
Masa total sólidos ensayo (g)	15

(%STR/100) =	0,3365	
(%ST/100) =	0,15	
Ecuación 1 =	0,3365 * MR + 0,15 * Mi	-----> ECUACIÓN COMPLETA 15
(%STR/100) * % NR * (C/N)R =	14,546222	
(ST/100) * % Ni * (C/N)I =	5,676	
(%STR/100) * % NR =	0,72011	
(%ST/100) * % Ni =	0,33	
Ecuación 2 =	$\frac{14,546222 * MR + 5,676 * Mi}{0,72011 * MR + 0,33 * Mi} =$ Entre 0 y 17,2	-----> ECUACIÓN COMPLETA 19,999542
* PARA C/N = 18		Intentar con 20
(%STR/100) * % NR * 20	14,4022	__ x MR = 0,144022
(%ST/100) * % Ni * 20	6,6	__ x Mi = -0,924
Ecuación 2.1 =	0,144022 * MR + -0,924 * Mi = 0	

	MR	Mi	r										
	0,3365	0,15	15										
	0,144022	-0,924	0										
MATRIZ													
A	0,3365	0,15		MR=	41,68053762	275187							
	0,144022	-0,924		Mi=	6,496660595	42998							
A (MR)	15	0,15											
	0	-0,924		MT=	48,17719822								
A (Mi)	0,3365	15											
	0,144022	0											

8.10 Cálculos de PBM

		M1-A	M1-B	M1-C	M2-A	M2-B	M2-C	M3-A	M3-B	M3-C	M4-A	M4-B	M4-C
	Cálculo de PBM =	143,15	152,95	140,613	263,6375	304,7625	280,88	184,975	272,388	185,85	368,4625	361,2875	407,925
	% de CH4 = 0,7	145,5708333			283,0916667			214,4041667			379,225		
	SV de sustrato = 0,8												

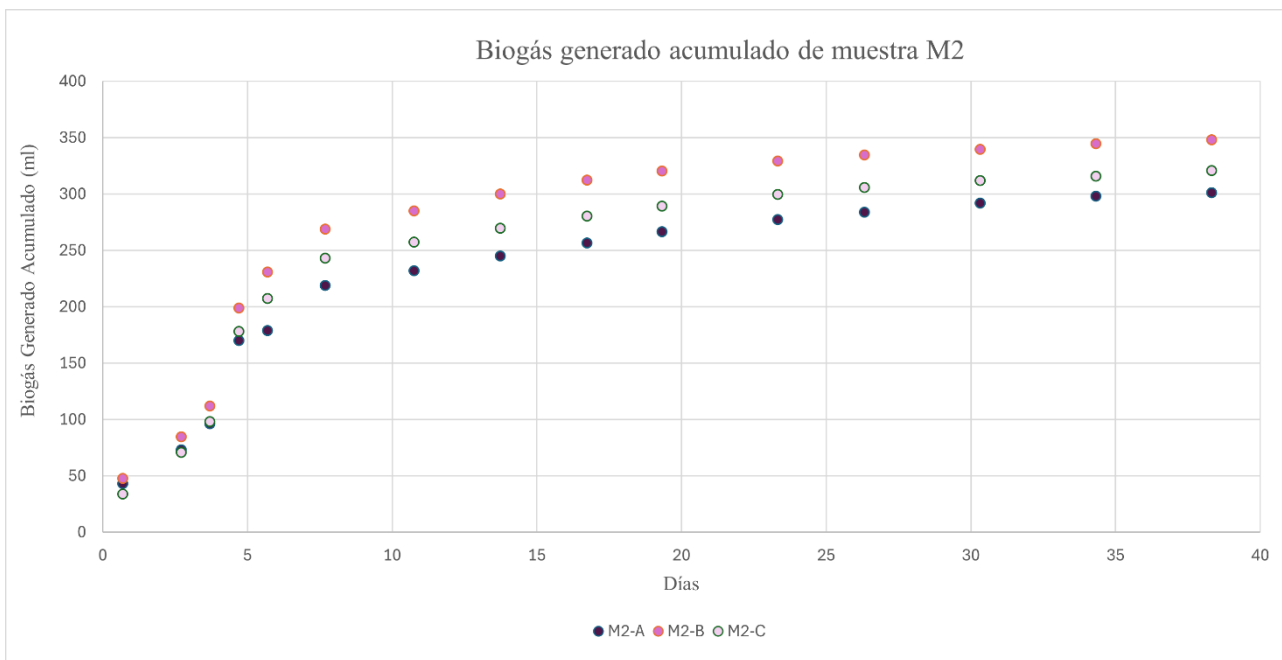
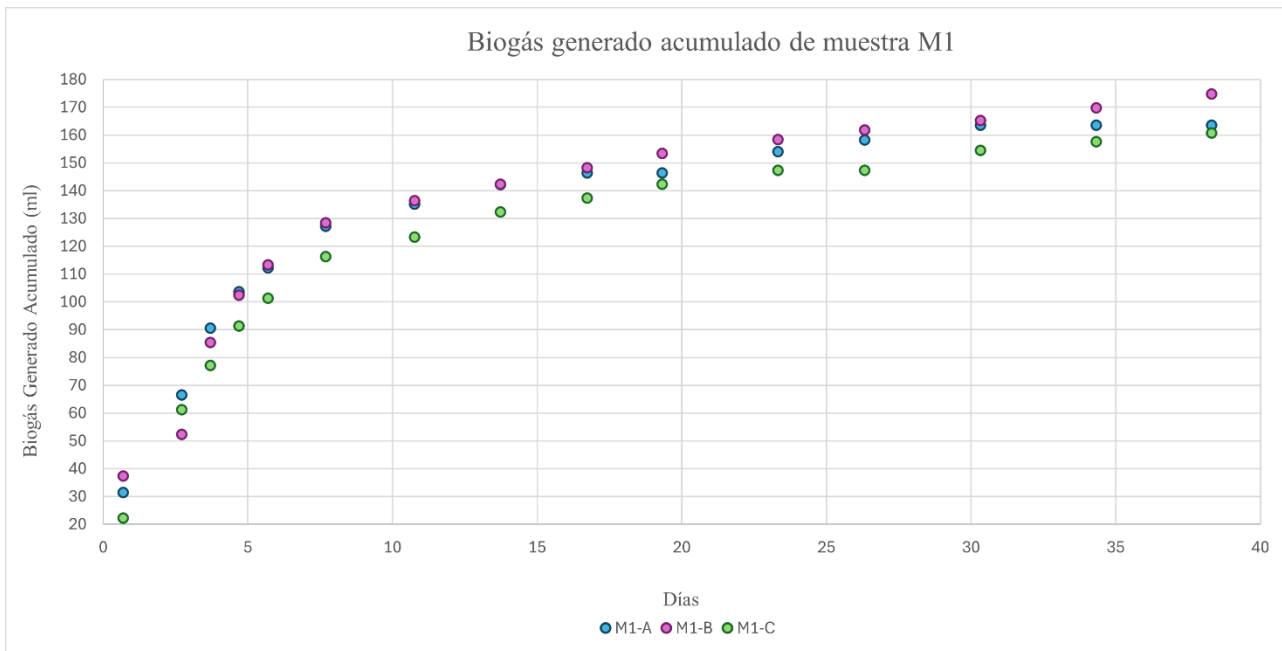
8.11 Mediciones de volúmenes producidos de biogás (ml)

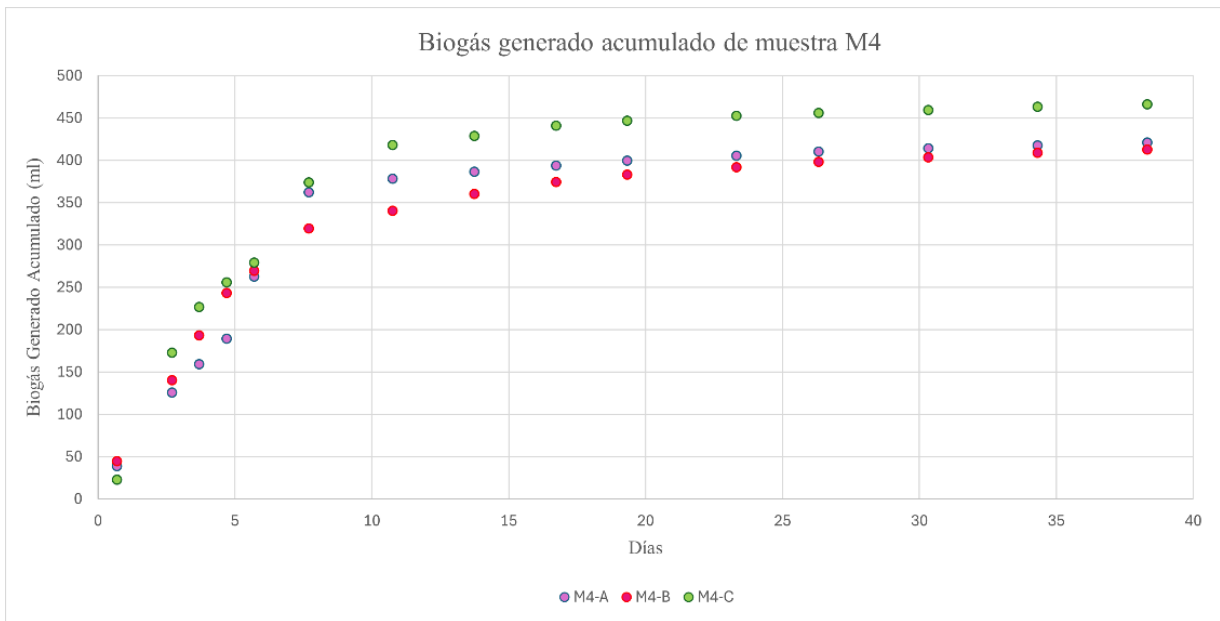
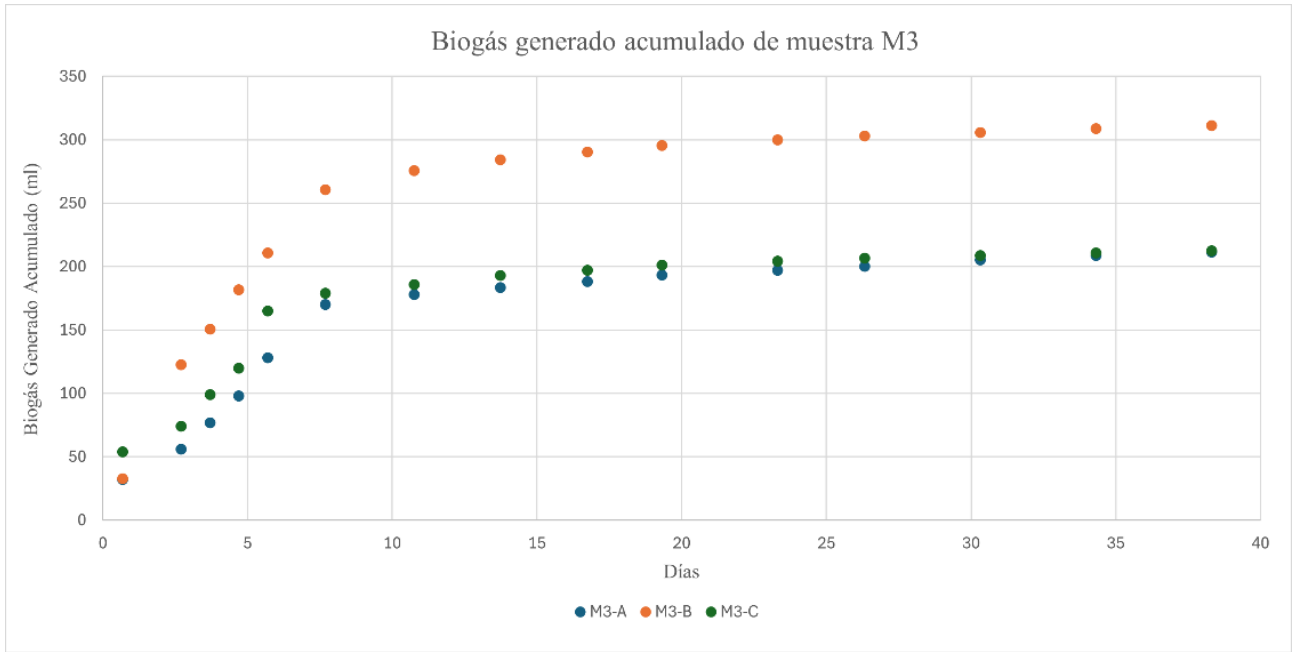
	Volúmenes medidos de biogás (ml)															
Tiempo (días)	M1-A	M1-B	M1-C	M2-A	M2-B	M2-C	M3-A	M3-B	M3-C	M4-A	M4-B	M4-C	Bs-1	Bs-2	Bi-1	Bi-2
0,6875	31,5	37,4	22,2	43	47,9	34	32	32,8	54	39	44,5	23	157	21	1	4
2,70833333	35	15	39	30	37	37	24	90	20	87	96	150	89	118	7	9
3,69791667	24	33	16	23,4	27	27	21	28	25	33,5	53	54	50	24	3,5	4,5
4,69791667	13,2	17	14,1	73,5	87	80,3	21	31	21	30	50	29	30	36	3,5	3,5
5,69791667	8,5	11	10	9	32	29	30	29	45	73	26	23	107	12	0	0
7,69097222	15	15	15	40	38	36	42	50	14	100	50	95	15	90	6	13
10,7604167	8	8	7	13	16	14	8	15	7	16	21	44	10	20	3	10
13,7361111	7	6	9	13	15	12,5	5,5	8,5	7	8	20	11	15	23	5	18
16,7361111	4,2	5,8	5	11,6	12,4	10,6	4,9	6,2	4	7,2	14	12	11	12,4	4	6,4
19,3194444	0	5,2	5	10	8	9	5	5	4,2	6	8,6	6	6	9,2	2,8	40
23,3194444	7,6	5	5	10,8	9	10,4	3,6	4,4	3	5,8	9	5,6	6,6	9,9	-	77
26,3194444	4,2	3,4	0	6,8	5,2	6,2	3,2	3,2	2,6	4,8	6	3,6	6,6	5	-	29,6
30,3194444	5,4	3,4	7,2	8	5	6	5	2,8	2	4	5,6	3,2	6	7,4	-	36,8
34,3194444	0	4,6	3,2	6	5	4	3,6	3	2	3,4	5	3,8	5,8	6	-	-
38,3194444	0	5	3	3,2	3,8	5	2,6	2,4	1,6	3,4	4,2	3	5	5,4	-	-
TOTAL	163,6	174,8	160,7	301,3	348,3	321	211,4	311,3	212,4	421,1	412,9	466,2	520	399,3	35,8	251,8

8.12 Mediciones de biogás producido acumulado (ml)

Volúmenes de bigás producido acumulados												
Masas (g)	40,32	40,32	40,32	75,6	75,6	75,6	25,7	25,7	25,7	48,18	48,18	48,18
Tiempo (días)	M1-A	M1-B	M1-C	M2-A	M2-B	M2-C	M3-A	M3-B	M3-C	M4-A	M4-B	M4-C
0,6875	31,5	37,4	22,2	43	47,9	34	32	32,8	54	39	44,5	23
2,708333	66,5	52,4	61,2	73	84,9	71	56	122,8	74	126	140,5	173
3,697917	90,5	85,4	77,2	96,4	111,9	98	77	150,8	99	159,5	193,5	227
4,697917	103,7	102,4	91,3	169,9	198,9	178,3	98	181,8	120	189,5	243,5	256
5,697917	112,2	113,4	101,3	178,9	230,9	207,3	128	210,8	165	262,5	269,5	279
7,690972	127,2	128,4	116,3	218,9	268,9	243,3	170	260,8	179	362,5	319,5	374
10,76042	135,2	136,4	123,3	231,9	284,9	257,3	178	275,8	186	378,5	340,5	418
13,73611	142,2	142,4	132,3	244,9	299,9	269,8	183,5	284,3	193	386,5	360,5	429
16,73611	146,4	148,2	137,3	256,5	312,3	280,4	188,4	290,5	197	393,7	374,5	441
19,31944	146,4	153,4	142,3	266,5	320,3	289,4	193,4	295,5	201,2	399,7	383,1	447
23,31944	154	158,4	147,3	277,3	329,3	299,8	197	299,9	204,2	405,5	392,1	452,6
26,31944	158,2	161,8	147,3	284,1	334,5	306	200,2	303,1	206,8	410,3	398,1	456,2
30,31944	163,6	165,2	154,5	292,1	339,5	312	205,2	305,9	208,8	414,3	403,7	459,4
34,31944	163,6	169,8	157,7	298,1	344,5	316	208,8	308,9	210,8	417,7	408,7	463,2
38,31944	163,6	174,8	160,7	301,3	348,3	321	211,4	311,3	212,4	421,1	412,9	466,2

8.13 Gráficos de volúmenes acumulados de generación de biogás (ml) de cada muestra.





8.14 Cálculos de potencial bioquímico metanogénico

		M1-A	M1-B	M1-C	M2-A	M2-B	M2-C	M3-A	M3-B	M3-C	M4-A	M4-B	M4-C
Cálculo de PBM =		143,15	152,95	140,613	263,6375	304,7625	280,88	184,975	272,388	185,85	368,4625	361,2875	407,925
% de CH4 =	0,7	145,5708333			283,0916667			214,4041667			379,225		
SV de sustrato =	0,8												

8.15 Cálculo para establecer el día de producción menor a 10% y cálculos de productividad total. Lo resaltado corresponde al día 7.

Días	M1 - A	M1 - B	M1 - C	M2 - A	M2 - B	M2 - C	M3 - A	M3 - B	M3 - C	M4 - A	M4 - B	M4 - C
7,6909722	13%	13%	15%	22%	16%	17%	33%	24%	8%	38%	19%	34%
10,760417	6%	6%	6%	6%	6%	6%	5%	6%	4%	4%	7%	12%

Tiempo (días)	Masas (g)											
	M1-A	M1-B	M1-C	M2-A	M2-B	M2-C	M3-A	M3-B	M3-C	M4-A	M4-B	M4-C
	40,32	40,32	40,32	75,6	75,6	75,6	25,7	25,7	25,7	48,18	48,18	48,18
0,6875	1,1364	1,3492	0,8009	0,8273	0,9216	0,6542	1,8111	1,8564	3,0562	1,1774	1,3434	0,6944
2,7083333	0,6090	0,4799	0,5604	0,3565	0,4147	0,3468	0,8045	1,7643	1,0632	0,9656	1,0767	1,3258
3,6979167	0,6070	0,5728	0,5178	0,3448	0,4003	0,3505	0,8102	1,5868	1,0417	0,8952	1,0861	1,2741
4,6979167	0,5475	0,5406	0,4820	0,4784	0,5600	0,5020	0,8117	1,5058	0,9939	0,8372	1,0758	1,1310
5,6979167	0,4884	0,4936	0,4409	0,4153	0,5360	0,4812	0,8741	1,4395	1,1268	0,9562	0,9817	1,0163
7,6909722	0,4102	0,4141	0,3750	0,3765	0,4625	0,4184	0,8601	1,3195	0,9056	0,9783	0,8622	1,0093
10,760417	0,3116	0,3144	0,2842	0,2851	0,3502	0,3163	0,6437	0,9973	0,6726	0,7301	0,6568	0,8063
13,736111	0,2568	0,2571	0,2389	0,2358	0,2888	0,2598	0,5198	0,8053	0,5467	0,5840	0,5447	0,6482
16,736111	0,2170	0,2196	0,2035	0,2027	0,2468	0,2216	0,4380	0,6754	0,4580	0,4883	0,4644	0,5469
19,319444	0,1879	0,1969	0,1827	0,1825	0,2193	0,1981	0,3895	0,5952	0,4052	0,4294	0,4116	0,4802
23,319444	0,1638	0,1685	0,1567	0,1573	0,1868	0,1701	0,3287	0,5004	0,3407	0,3609	0,3490	0,4028
26,319444	0,1491	0,1525	0,1388	0,1428	0,1681	0,1538	0,2960	0,4481	0,3057	0,3236	0,3139	0,3598
30,319444	0,1338	0,1351	0,1264	0,1274	0,1481	0,1361	0,2633	0,3926	0,2680	0,2836	0,2764	0,3145
34,319444	0,1182	0,1227	0,1140	0,1149	0,1328	0,1218	0,2367	0,3502	0,2390	0,2526	0,2472	0,2801
38,319444	0,1059	0,1131	0,1040	0,1040	0,1202	0,1108	0,2147	0,3161	0,2157	0,2281	0,2236	0,2525
TOTAL =	5,4424	5,5301	4,7261	4,3513	5,1562	4,4416	9,3022	14,5528	11,6390	9,4905	9,9136	10,5422

8.16 Cálculos de productividad promedio de cada muestra utilizada en los gráficos presentados.

Días	Productividad (ml de Ch ₄ /día)			
	M1	M2	M3	M4
0,6875	44,170	60,558	62,545	51,636
2,70833333	22,166	28,172	24,000	54,092
3,69791667	22,815	27,610	23,797	52,282
4,69791667	21,102	38,819	23,202	48,887
5,69791667	19,124	36,101	25,711	47,444
7,69097222	16,118	31,687	22,689	45,768
10,7604167	12,233	23,980	16,914	35,222
13,7361111	10,117	19,768	13,705	28,538
16,7361111	8,602	16,914	11,514	24,084
19,3194444	7,628	15,118	10,213	21,219
23,3194444	6,571	12,956	8,602	17,871
26,3194444	5,918	11,710	7,732	16,016
30,3194444	5,313	10,374	6,827	14,044
34,3194444	4,770	9,311	6,113	12,525
38,3194444	4,342	8,443	5,530	11,310

8.17 Datos utilizados para análisis de regresión.

Muestra	ORIGINAL			CODIFICADO			RESULTADOS	
	C/N	%Sólidos	C/N*%Sólidos	C/N	Concentración Sólidos	C/N * CS	Potencial Metanogénico	Productividad?
M1 - A	18,5	8	148	-1	-1	1	20,45	0,41
M1 - B	18,5	8	148	-1	-1	1	21,85	0,41
M1 - C	18,5	8	148	-1	-1	1	20,09	0,38
M2 - A	18,5	15	277,5	-1	1	-1	20,09	0,38
M2 - B	18,5	15	277,5	-1	1	-1	23,22	0,46
M2 - C	18,5	15	277,5	-1	1	-1	21,40	0,42
M3 - A	20	8	160	1	-1	-1	26,43	0,86
M3 - B	20	8	160	1	-1	-1	38,91	1,32
M3 - C	20	8	160	1	-1	-1	26,55	0,91
M4 - A	20	15	300	1	1	1	28,07	0,98
M4 - B	20	15	300	1	1	1	27,53	0,86
M4 - C	20	15	300	1	1	1	31,08	1,01

8.18 Análisis de regresión obtenido para respuesta del Potencial Bioquímico Metanogénico, con factores codificados.

Resumen								
<i>Estadísticas de la regresión</i>								
Coeficiente de correlación múltiple	0,961850267							
Coeficiente de determinación R^2	0,925155936							
R^2 ajustado	0,897089412							
Error típico	30,08874244							
Observaciones	12							
ANÁLISIS DE VARIANZA								
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F			
Regresión	3	89527,33089	29842,44363	32,96296797	7,4871E-05	< 0,05		
Residuos	8	7242,659375	905,3324219					
Total	11	96769,99026						
	Coeficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	255,5729167	8,685871775	29,42397992	1,92852E-09	235,5432604	275,6025729	235,5432604	275,6025729
C/N	41,24166667	8,685871775	4,748132109	0,001448724	21,21201044	61,2713229	21,21201044	61,2713229
Concentración Sólidos	75,58541667	8,685871775	8,70211058	2,37178E-05	55,55576044	95,6150729	55,55576044	95,6150729
C/N * CS	6,825	8,685871775	0,785758779	0,454649613	-13,20465623	26,85465623	-13,20465623	26,85465623
				menor a 0,05 para significativa				

8.19 Análisis de regresión obtenido para respuesta de la productividad, con factores codificados

Resumen								
<i>Estadísticas de la regresión</i>								
Coefficiente de correlación múltiple	0,935679075							
Coefficiente de determinación R^2	0,875495331							
R^2 ajustado	0,82880608							
Error típico	0,134520772							
Observaciones	12							
ANÁLISIS DE VARIANZA								
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F			
Regresión	3	1,017974475	0,339324825	18,7515395	0,00056109			
Residuos	8	0,144766706	0,018095838					
Total	11	1,16274118						
	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	0,699302356	0,038832802	18,00803235	9,27638E-08	0,609753754	0,788850958	0,609753754	0,788850958
C/N	0,289853791	0,038832802	7,46414823	7,16741E-05	0,200305189	0,379402393	0,200305189	0,379402393
Concentración Sólidos	-0,014767245	0,038832802	-0,380277601	0,713637238	-0,104315847	0,074781357	-0,104315847	0,074781357
C/N * CS	-0,024452293	0,038832802	-0,629681387	0,546461503	-0,114000895	0,065096309	-0,114000895	0,065096309

8.20 Cálculos para establecer lotes de alimentación

ST residuo =	0,3365		Humedad del residuo =	0,6635
ST inóculo =	0,15		Humedad del inóculo =	0,85
		Relación S/I =		6,4
Residuo (kg) =	205640		Inóculo (kg) =	32131,25
Sólidos (kg) =	69197,86		Sólidos (kg) =	4819,6875
Humedad (kg) =	136442,14		Humedad (kg) =	27311,563

Total sustrato (kg) =	237771,25	----->	100%
Total sólidos (kg) =	74017,548	----->	31%
Total humedad (kg) =	163753,7	----->	69%
% sólidos requerido =	15%		
% humedad requerida =	85%		

ECUACIONES			
1	$(M_s/MT)*100 + (M_h/MT)*100 + (M_a/MT)*100 = 100\%$		
2	$MT = M_s + M_h + M_a$	-----> $MT - M_a = M_s + M_h$	$MT - M_a = 237771,25$
3	$(M_h + M_a)/MT * 100 = 85\%$	-----> $0,85*MT - M_a = M_h$	$0,85*MT - M_a = 163753,7$

	MT	Ma	R						
1	1	-1	237771,25						
2	0,85	-1	163753,7025						
MATRIZ									
	A	1 0,85	-1 -1	MT =	493450				
	A(MT)	237771,25 163753,7025	-1 -1	Ma =	255679	Agua adicional	0,804289544	kg de agua por 1 kg de residuo	
	A (Ma)	1 0,85	237771,25 163753,7025						
	LOTES POR CADA	25	días						
	Mes	días	Total (kg)	por día	en 25 días				
	Febrero	29	118500	4086	102155,1724				
	Marzo	31	267980	8645	216112,9032				
	Abril	30	331430	11048	276191,6667				
	Mayo	31	104650	3376	84395,16129				
			822560						