

**EVALUACIÓN DE LAS TASAS DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS AL AÑADIR  
BACTERIAS FACULTATIVAS A PURINES BOVINOS CON EL FIN DE  
DETERMINAR SI ES POSIBLE SU USO COMO COMBUSTIBLE EN  
REEMPLAZO DE LA LEÑA COMO MÉTODO DE CALEFACCIÓN**

**PROYECTO DE TÍTULO II**

Para Optar al Título Profesional de Ingeniero Civil Ambiental  
Y el Grado Académico Licenciado en Ciencias de la Ingeniería  
Otorgado por la Universidad de Playa Ancha

**NICOLE FRANCISCA CASTRO VERA**

Profesores Guía: Ximena Cristina Espinoza Ortiz  
Víctor Andrés Garcés Escalante

Valparaíso, Chile

2016

A mis padres, Nelson y Adelina,  
por guiarme y apoyarme en cada momento

A mis hermanos, Cristóbal, Catalina y Macarena,  
que forman parte importante de mi vida

A mi sobrina, Amber,  
que me ha dado esperanza en este último tramo

A mi novio, Diego  
por su apoyo incondicional, por su amor, cariño y confianza

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco y dedico este logro a mis padres, gracias por creer en mí y por su apoyo cada segundo en este largo proceso. A mis hermanos y cuñado, por la paciencia y la ayuda brindada. Muchas gracias por su fortaleza, por darme ánimo, por cada café a las dos de la madrugada, por cada vez que en la noche subieron a entregarme una frazada para no pasar frío y por estar ahí cada vez que los necesite.

A mi novio y amigo, gracias por acompañarme durante este periodo, por tu amor, tu confianza, por estar siempre a mi lado en los buenos y malos momentos. Por haberme ayudado tanto, no sólo en asuntos académicos, sino también en la vida misma. Gracias por soportarme y elegirme como compañera, todo hubiera sido mucho más difícil si no hubieras estado a mi lado.

A esa persona que siempre va ocupar un lugar importantísimo en mi corazón, gracias por haber sido parte de mi vida, por haberte preocupado siempre por nuestro bienestar, por nuestro presente y futuro. Este logro también es porque formaste parte de mi vida, muchas gracias.

A mi sobrina por el nuevo sentido que ha dado a la familia, llenándonos de amor, de risas, uniéndonos y regalándonos de su ternura infinita. Voy a esforzarme en construir un mundo mejor para ti y para los que vendrán.

Gracias a todos quienes con sus palabras estuvieron apoyándome en cada momento.

## **RESUMEN**

En Chile el 20% de la energía primaria consumida proviene de la leña que es la segunda fuente de energía más importante después del petróleo. La crisis energética mundial, ha causado el aumento del consumo de la leña en la zona sur del país, especialmente en la población de menores recursos, causando así el aumento de la contaminación ambiental urbana. La digestión anaerobia aparece como una buena alternativa para paliar este problema, siendo un gas altamente energético que puede ser usado como combustible.

En el presente estudio se determinó la cantidad de energía que se puede obtener a partir de purines bovinos, estableciendo si es posible su utilización como combustible en reemplazo de la leña para calefacción residencial, evaluando finalmente la factibilidad económica y ambiental del uso de biogás. Se demostró que la cantidad de energía generada puede suplir en su totalidad la demanda energética para calefacción en un hogar promedio en la comuna de estudio, convirtiéndose en una alternativa completamente factible para el problema ambiental que se vive en las regiones del sur del país. Para el logro de los objetivos, se diseñó un experimento que constó de seis reactores anaerobios tipo batch, tres de ellos a temperatura ambiente y otros tres que se mantuvieron a 37°C durante todo el experimento. Además, se mezcló los purines bovinos con distintas concentraciones de bacterias facultativas para ver sus efectos en la producción de biogás y en la disminución de parámetros físico-químicos del efluente. Los ensayos estuvieron con las siguientes concentraciones: sin bacterias, con 0,05 ml y 0,1 ml de bacterias para ambos arreglos. Utilizando el método por desplazamiento de líquido se monitoreo la producción de metano durante 28 días. La producción fue mayor en los ensayos que se mantuvieron a 37°C y a su vez, dentro de cada arreglo de temperatura, los que tenían más bacterias mostraron mayor producción de metano y disminución de sólidos disueltos y DQO (demanda química de oxígeno).

## **ABSTRACT**

In Chile, the 20% of the energy primary consumed comes from the firewood that is the second source of energy more important after the oil. The global energy crisis has caused the increase in the consumption of firewood in the southern of the country, especially in the lowest-income population, thus causing the increase of the urban environmental pollution. Anaerobic digestion appears as a good alternative to alleviate this problem, being a highly energetic gas that can be used as fuel.

The present study determined the amount of energy that it is possible to obtain from purines bovine, establishing if possible use as fuel instead firewood for residential heating. Evaluating finally the economic and environmental practicality of the use of biofuel as substitution of the firewood as fuel. In the large-scale study it was demonstrated that the amount of energy generated can supply the entirely the energy demand for heating in an average home in the commune of study, reducing the atmospheric emissions, becoming a fully feasible alternative to the environmental problem that exists in the southern regions of the country. To achieve the objectives, it was considered a design of six type batch anaerobic reactors, three of them to temperature ambience and the three others that were maintained at 37°C during the entire experiment. Also, the bovine purines were mixed with different concentrations of optional bacteria to see its effects in the production of biofuel and the decrease of physical-chemical parameters of the effluent. The tests were with the following concentrations: without bacteria, with 0,05 ml and 0,1 ml of bacteria for both arrangements. Using the liquid displacement method and monitoring the methane production for 28 days with the following results. The production was higher in those tests that were maintained at 37°C and in turn, the test which had more bacteria showed a higher production of methane and decrease of dissolved solids and COD (Chemical Oxygen Demand).

## **INTRODUCCIÓN**

Disponer de energía es una condición necesaria para el desarrollo económico y el crecimiento de cualquier país. A lo largo de los últimos años, Chile ha tenido serios problemas energéticos debidos principalmente a la cantidad de energía que importa para subsistir y desarrollarse. Es por esta razón que se hace bastante vulnerable a la volatilidad e inestabilidad de los precios en los mercados internacionales y a las restricciones de abastecimiento que puedan producirse, ya sea por fenómenos ambientales, como también por fenómenos políticos o de mercado. El mayor ejemplo de esta problemática es el corte de gas natural desde Argentina en 2002 y las severas sequías que han azotado al país, razones por las cuales Chile necesita una matriz energética más diversa y segura en abastecimiento y suministro, que sea sustentable, a precios razonables y que además de tener buena conectividad, permita cierta independencia regional.

A raíz de esta problemática se destaca dentro de la Agenda de Energía 2014 la integración de las Energías Renovables No Convencionales (ERNC) al sistema eléctrico como uno de los principales ejes, para así diversificar la matriz energética y hacerla más limpia y segura. Algunos de los tópicos presentados son la promoción de un mercado de ERNC de autoconsumo socialmente eficiente, el desarrollo de la geotermia y la mejoría en el uso de la leña. Cabe destacar en este punto que la leña es el segundo componente de mayor relevancia en la matriz energética primaria, después del petróleo (CNE, 2014). Esto genera bastantes problemas ambientales debido a su mal uso, llevando a que numerosas ciudades de la zona centro-sur del país hayan sido decretadas como zonas saturadas por material particulado. Las condiciones geográficas en estas localidades favorecen este tipo de problema, ya que al estar valles interiores están rodeadas por elevaciones topográficas en casi todo su entorno, razón por la cual no presentan buena ventilación y la contaminación queda en la atmósfera por más tiempo. Por otro lado, las estufas a leña generan

altos niveles de contaminación, tanto fuera como dentro de los hogares, siendo la causante de graves problemas a la salud.

Bajo este escenario el biogás emerge como una buena alternativa para apalea el problema energético actual, ya que se trata de un gas combustible altamente energético. Su producción se basa en un proceso natural que ocurre en forma espontánea en un entorno anaerobio, es decir, carente de oxígeno. Dicho proceso lo realizan microorganismos como parte del ciclo biológico de materia orgánica, el cual involucra la fermentación o digestión de materiales orgánicos para obtener un gas rico en metano ( $\text{CH}_4$ ). La digestión se efectúa dentro de un biodigestor, que es un sistema diseñado para optimizar la producción de biogás, permitiendo así la obtención de energía limpia y de bajo costo a partir de una fuente renovable.

El biogás es un combustible que puede utilizarse directamente en quemadores para hornos, estufas, alimentación de motores de combustión interna o en la producción de electricidad. Por tanto, se trata de un combustible sustentable que puede dar reemplazo a la leña en localidades que dispongan de desechos orgánicos, como lo son las zonas rurales del país. Incluir el biogás en el ciclo de una localidad agrícola es interesante para los agricultores, ya que además en el biodigestor se forma un efluente bajo en materia orgánica que es utilizado como fertilizante y puede dar reemplazo a los tradicionales permitiendo una mayor retribución económica. Desde un punto de vista más amplio, también puede permitir al complejo agrícola convertirse en autosuficiente en cuanto a nutrientes de planta, al usar su propio fertilizante en sus cultivos. El uso de esta tecnología permite también mejorar ampliamente el balance de Gases de Efecto Invernadero (GEI), ya que al quemar el metano no se está liberando a la atmósfera. En este punto cabe destacar que el metano es el segundo gas que

más contribuye al efecto invernadero, ya que en la atmósfera es capaz de capturar 21 veces más calor que el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

Este proyecto evaluará la factibilidad de usar biogás como medio de calefacción en una de las regiones con los problemas antes mencionados, atendiendo así las necesidades diarias en los hogares, en cuanto a calefacción residencial. Se trabajará con la adición de distintas concentraciones de bacterias facultativas, tasando así la producción de metano y establecer finalmente cuál es la opción más óptima. También contribuirá a la reducción de GEI derivados de la liberación de metano durante la gestión del estiércol, y al reemplazar la leña como combustible mejorará las condiciones ambientales reduciendo la contaminación que ésta produce. Así la industria local podría volverse autosuficiente en cuanto a calefacción promoviendo el uso de energías renovables no convencionales.

## **INDICE**

AGRADECIMIENTOS.....	iii
RESUMEN.....	iv
ABSTRACT.....	v
INTRODUCCIÓN.....	vi
CAPÍTULO I: ANTECEDENTES GENERALES DEL PROYECTO .....	1
1.1. Caracterización del Pequeño Productor Lechero.....	1
1.1.1. Producción, composición y caracterización de los purines.....	2
1.2. Digestión Anaerobia.....	2
1.3. Objetivos.....	5
1.3.1. Objetivo General.....	5
1.3.2. Objetivos Específicos .....	5
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO .....	6
2.1. Situación energética .....	6
2.1.1. Energías Renovables No Convencionales (ERNC).....	14
2.1.2. Consumo de Leña en Chile .....	16
2.1.2.1. Costos de la energía utilizada para métodos de calefacción .....	22
2.2. Problema ambiental Región de Los Lagos .....	24
2.3. Co-Digestión anaerobia.....	26
2.3.1. Sistemas de tratamiento anaerobio .....	27
2.3.1.1. Factores que influyen en el proceso .....	28
2.3.1.2. Ventajas y desventajas del tratamiento.....	31
2.3.1.3. Productos finales del tratamiento anaerobio .....	33
2.4. Impactos medioambientales de los purines .....	35

3.1.1.	Impactos ambientales en la atmósfera .....	35
2.5.	Marco referencial para la experimentación .....	37
CAPITULO III: MÉTODOS Y MATERIALES .....		39
3.1.	Etapa preliminar: .....	39
3.1.1.	Recolección y transporte de estiércol bovino y los residuos de cocina	39
3.1.2.	Análisis elemental de la muestra .....	40
3.2.1.1.	Sistema micorbiológico Oikos Versal AG .....	43
3.2.2.	Procedimiento .....	45
3.2.3.	Medición de Metano (CH <sub>4</sub> ) .....	47
3.2.3.1.	Medición por desplazamiento .....	47
3.2.4.	Monitoreo de los ensayos .....	49
3.3.	Métodos analíticos .....	49
3.3.1.	Demanda Química de Oxígeno .....	50
3.3.2.	Sólidos Totales .....	50
3.3.3.	Sólidos Volátiles .....	50
3.4.	Análisis de Factibilidad .....	51
3.4.1.	Análisis Económico .....	51
3.4.1.1.	Diseño del biodigestor .....	52
3.4.1.2.	Costo del biodigestor .....	58
3.4.2.	Análisis Ambiental .....	59
3.4.2.1.	Reducción de Gases de Efecto Invernadero (GEI) .....	59
CAPITULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIONES .....		64
4.1.	Etapa preliminar .....	64

4.1.1. Recolección y transporte de estiércol bovino y los residuos de cocina	64
4.1.2. Caracterización del sustrato	64
3.5. Operación	66
3.5.1. Monitoreo del efluente gaseoso	66
3.6. Análisis de factibilidad económica y ambiental	76
3.6.1. Diseño del biodigestor	76
3.6.2. Factibilidad económica	81
3.6.3. Arreglo Sin Bacterias a 37°C	87
3.6.4. Arreglo con 0,05 ml de Bacterias a 37°C	89
3.6.5. Arreglo con 0,1 ml de Bacterias a 37°C	90
3.6.6. Arreglo Sin Bacterias a Temperatura Ambiente	91
3.6.7. Arreglo con 0,05 ml de Bacterias a Temperatura Ambiente	93
3.6.8. Arreglo con 0,1 ml de Bacterias a Temperatura Ambiente	94
3.6.9. Resumen de Ingresos y Costos para los arreglos propuestos.	96
3.7. Análisis Ambiental	99
3.7.1. Reducción de Gases de Efecto Invernadero (GEI)	99
CONCLUSIONES	105
RECOMENDACIONES	109
BIBLIOGRAFÍA	111
ANEXO 1: Flujos de Caja	115
ANEXO 2: Factores de emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI) estándar por combustión, por tipo de energético.	133
ANEXO 3: Factores de emisión de metano (CH <sub>4</sub> ) en la Gestión del Estiércol.	135

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Etapas de la Digestión Anaeróbica .....	4
Tabla 2: Consumo Promedio de Leña en Hogares Sector Residencial por Región .....	18
Tabla 3: Consumo Promedio de Leña Sector Residencial por mes.....	19
Tabla 4: Tabla de Poder Calorífico según Especies .....	21
Tabla 5: Ventajas y Desventajas de la Digestión Anaerobia.....	32
Tabla 6: Componentes del biogás en función del sustrato utilizado .....	33
Tabla 7: Producción de biogás por residuo animal .....	34
Tabla 8: Producción de biogás unitaria.....	34
Tabla 9: Relación C/N de distintas materias primas .....	40
Tabla 10: Análisis de laboratorio.....	41
Tabla 11: Tiempos de retención.....	53
Tabla 12: Potencial de calentamiento global de diferentes GEI.....	63
Tabla 13: Proporción C/N de la mezcla .....	64
Tabla 14: Proporciones utilizadas .....	65
Tabla 15: Resultados del análisis de la Fundo vs Resultados referenciales.....	66
Tabla 16: Proporción de agua utilizada.....	66
Tabla 17: Producción de CH <sub>4</sub> Acumulado.....	69
Tabla 18: Resultados Análisis Físico-Químicos después del tratamiento .....	72
Tabla 19: Producción de Energía por ensayo (kcal) .....	76
Tabla 20: Composición Mezcla a Digerir .....	77
Tabla 21: Resumen Volúmenes.....	78
Tabla 22: Dimensiones Tanque de Alimentación y Biodigestor .....	79
Tabla 23: Detalle de la Inversión Inicial .....	82
Tabla 24: Consumo de Leña en la Región de Los Lagos .....	84
Tabla 25: Gasto asociado a suplir la demanda energética del reemplazo de leña .....	85

Tabla 26: Cantidad de Digestato Producido .....	86
Tabla 27: Generación CH <sub>4</sub> vs Uso de Leña (Arreglo Sin Bacterias a 37°C) .....	88
Tabla 28: Gastos e Ingresos para el arreglo Sin Bacterias a 37°C .....	88
Tabla 29: Generación CH <sub>4</sub> vs Uso de Leña (Arreglo con 0,05 ml de Bacterias a 37°C).....	89
Tabla 30: Total ingresos al año por Reemplazo de Combustible y Venta de Fertilizante (Arreglo con 0,05 ml de Bacterias a 37°C) .....	89
Tabla 31: Generación CH <sub>4</sub> vs Uso de Leña (Arreglo con 0,1 ml de Bacterias a 37°C).....	90
Tabla 32: Total ingresos al año por Reemplazo de Combustible y Venta de Fertilizante (Arreglo con 0,05 ml de Bacterias a 37°C) .....	91
Tabla 33: Generación CH <sub>4</sub> vs Uso de Leña (Arreglo Sin Bacterias a Temperatura Ambiente) .....	92
Tabla 34: Total ingresos al año por Reemplazo de Combustible y Venta de Fertilizante (Arreglo con Sin Bacterias a 37°C).....	92
Tabla 35: Generación CH <sub>4</sub> vs Uso de Leña (Arreglo 0,05 ml de bacterias a Temperatura Ambiente) .....	93
Tabla 36: Total ingresos al año por Reemplazo de Combustible y Venta de Fertilizante (Arreglo con 0,05 ml de Bacterias a Temperatura Ambiente).....	94
Tabla 37: Generación CH <sub>4</sub> vs Uso de Leña (Arreglo Sin Bacterias a Temperatura Ambiente) .....	95
Tabla 38: Total ingresos al año por Reemplazo de Combustible y Venta de Fertilizante (Arreglo con 0,05 ml de Bacterias a 37°C) .....	95
Tabla 39: Resumen Ingresos y Gastos Ensayos a 37°C .....	97
Tabla 40: Resumen Ingresos y Gastos Ensayos a Temperatura Ambiente.....	98
Tabla 41: Factores de emisión para combustión de Leña (kg de GEI/TJ) .....	100
Tabla 42: Emisiones generadas por el uso de biogás en reemplazo de la leña .....	102

Tabla 43: Emisiones generadas por el uso de biogás en reemplazo de la leña .....	103
Tabla 44: Emisiones reducidas por reemplazo de leña al año (kgCO <sub>2</sub> e) .....	104
Tabla 45: Factores de emisión estándar para combustión de energéticos (kg de GEI por TJ con base en poder calorífico neto) .....	133
Tabla 46: Factores de emisión de CH <sub>4</sub> por gestión del estiércol por temperatura para vacunos (kg CH <sub>4</sub> /cabeza/año).....	135

## ÍNDICE DE GRAFICOS

Gráfico 1: Matriz Energética Mundial, 2014 .....	6
Gráfico 2: Oferta Mundial Total de Energía Primaria desde 1971 al 2013, por Combustible (Mtoe).....	9
Gráfico 3: Suministro de Energía Primaria Total de la OECD del año 1971 a 2014, por Combustible (Mtoe) .....	10
Gráfico 4: Generación Mundial de Electricidad por Combustible, (tWh), .....	11
Gráfico 5: Capacidad Instalada por Tecnología SING .....	12
Gráfico 6: Capacidad Instalada por Tecnología SIC .....	13
Gráfico 7: Cumplimiento de Leyes ERNC por Tecnología .....	16
Gráfico 8: Caracterización Energética Sector Residencial (Total país).....	17
Gráfico 9: Distribución del Volumen Consumido por Especie en el Sector Residencial .....	20
Gráfico 10: Artefactos de Calefacción Utilizados en los Hogares a Nivel Nacional .....	22
Gráfico 11: Unidad de Venta de Leña a Nivel Nacional en el Sector Residencial .....	24
Gráfico 12: Producción diaria de CH <sub>4</sub> en Ensayos a 37°C.....	67
Gráfico 13: Producción diaria de CH <sub>4</sub> en Ensayos a Temperatura Ambiente ....	68
Gráfico 14: ml CH <sub>4</sub> Producido Acumulado en los Ensayos a 37°C (año 2016) .	70

Gráfico 15: ml CH <sub>4</sub> Producido Acumulado en los Ensayos a Temperatura Ambiente (año 2016) .....	71
Gráfico 16: Resultados de los análisis de Demanda Química de Oxígeno para cada ensayo.....	73
Gráfico 17: Resultado de los análisis de Sólidos Totales para cada ensayo ....	74
Gráfico18: Resultado de los análisis de Sólidos Volátiles para cada ensayo ...	75

## **CAPÍTULO I: ANTECEDENTES GENERALES DEL PROYECTO**

Si bien en Chile la situación de la Región Metropolitana representa el caso más emblemático y notorio de contaminación atmosférica, otras ciudades del país también representan altos niveles de contaminación del aire. Se han detectado altos niveles en ciudades cercanas a complejos mineros como Copiapó y Rancagua, industriales como Puchuncaví, y también en ciudades del sur que ocupan leña como fuente energética en invierno (Osorno, Temuco y Coyhaique). La combustión de biomasa es muy incompleta, generando gran cantidad de compuestos orgánicos parcialmente oxidados. Las partículas generadas son ultrafinas ( $< 0,1 \mu\text{m}$ ), lo que les permite traspasar fácilmente la barrera mucociliar, depositarse en bronquiólos y alvéolos y pasar así directamente a la sangre.

Por otro lado, el sur de Chile concentra la mayor cantidad de ganado bovino en Chile, siendo la Región de Los Lagos donde se encuentra la mayor cantidad de éstos, con 749.600 cabezas sólo en explotaciones grandes (Neumann Carmire & Vélis Miranda, 2012). En la encuesta de Neumann y Vélis no se consideran las pequeñas lecherías por lo que el número de cabezas de ganado es mucho mayor. Las lecherías tienen un gran potencial para la generación de energía por el tipo de residuo que se genera, materia prima con alto potencial en la generación de biogás, por tanto existe la posibilidad de paliar la contaminación causada por el uso de leña reemplazando el combustible con el gas generado en los planteles.

### **1.1. Caracterización del Pequeño Productor Lechero**

El Instituto Nacional de Estadísticas (INE) clasifica a los pequeños productores lecheros como aquellos que poseen un ganado entre 10 y 49 cabezas. Este sector comercial se concentra entre la región de Valparaíso y la región de Los Lagos, que es donde se dan las condiciones más propicias para alcanzar niveles competitivos de producción para el mercado interno y el de exportación.

Las sustentabilidad ambiental de la producción de leche es fundamental para su futuro desarrollo y consolidación. Actualmente el mercado alimenticio cuenta con consumidores informados y conscientes respecto del impacto que la producción puede tener en el medio ambiente, por lo que la responsabilidad ambiental se ha vuelto una materia prioritaria para muchas empresas del rubro.

### **1.1.1. Producción, composición y caracterización de los purines**

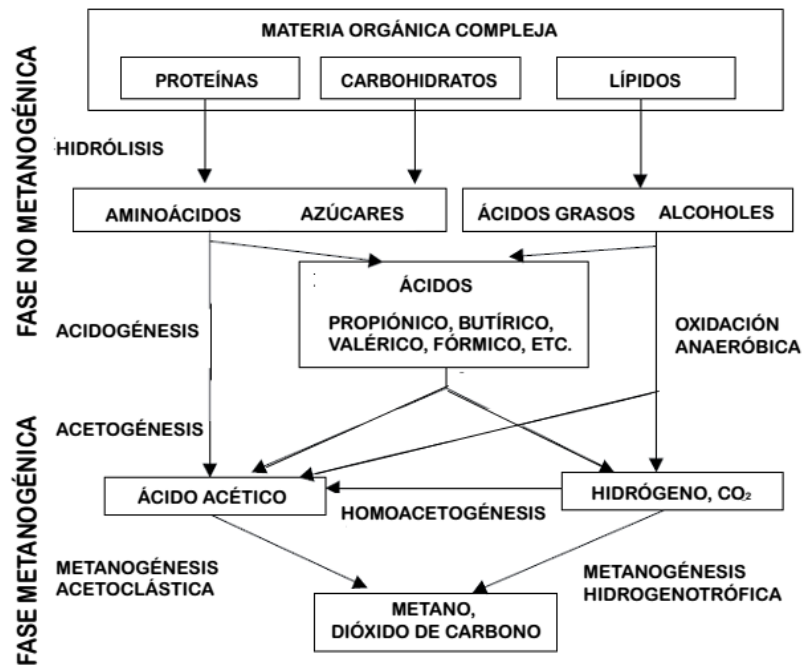
La mezcla de fecas, orina y agua proveniente de los patios, establos y salas de ordeña se denominan purines. Estos residuos contienen una gran cantidad de sólidos disueltos y en suspensión que enturbia el agua, y también provocan impactos en la atmósfera. Los efectos que generan son consecuencia de los gases que se desprenden en los procesos de transformación de la materia orgánica, y que pueden ser irritantes o asfixiantes, provocando molestias diversas en los habitantes de los núcleos de población situados en su radio de influencia. Uno de los grandes problemas para el manejo de estos residuos lo constituye el gran volumen acumulado, por lo que su almacenaje constituye un aspecto importante en los sistemas ganaderos. Es por esto que la digestión anaerobia es en su mayoría utilizada en complejos agrícolas o de plantas de tratamiento de agua, para disminuir esas molestias en la población cercana.

### **1.2. Digestión Anaerobia**

La digestión anaerobia es un proceso biológico degradativo en el cual, parte de la materia orgánica contenida en un sustrato es convertida en una mezcla de gases llamado biogás. La degradación está basada en complejas interacciones de varios grupos de microorganismos en condiciones anaerobias (ausencia de oxígeno). El proceso anaeróbico ha sido estudiado con bastante profundidad desde el punto de vista bioquímico y microbiológico, con lo cual se han establecido dos fases principalmente constituidas por varios subprocesos

mediante los cuales se desarrolla la transformación de las moléculas que conforman la materia orgánica biodegradable.

Figura 1: Esquema general de transformaciones bioquímicas durante el proceso de digestión anaerobia



Fuente: (Cendales Ladino, 2011)

En la Figura 1 se puede observar el diagrama general de las transformaciones bioquímicas que se suscitan en el proceso de digestión anaeróbica. La clasificación de cada una de estas fases se realiza de acuerdo a las características que presentan los conjuntos de poblaciones de microorganismos que desarrollan los subprocesos que conforman cada fase, los cuales pueden ser tanto del tipo facultativo como de naturaleza anaeróbica estricta.

Tabla 1: Etapas de la Digestión Anaeróbica

Fase no Metanogénica	Hidrólisis	Las bacterias en general no son capaces de asimilar material orgánico particulado por lo que éste debe degradarse previamente hasta polímeros o monómeros solubles. Los compuestos orgánicos son solubilizados por enzimas excretadas por bacterias hidrolíticas que actúan en el exterior celular. Esta etapa es la que limita la velocidad del proceso puesto que se requiere que se desarrolle el ataque enzimático sobre el sustrato para que se liberen los compuestos orgánicos que las poblaciones microbianas pueden descomponer.
	Acidogénesis	Los compuestos orgánicos producto de la hidrólisis son catabolizados por varios grupos de microorganismos. De acuerdo a la ruta metabólica utilizada durante la fermentación también se pueden generar compuestos orgánicos más reducidos como ácido láctico, etanol, ácido propiónico, ácido butírico, entre otros, los cuales deben ser oxidados por las bacterias que utilizan hidrógeno.
Fase Metanogénica	Acetogénesis	Durante este subproceso se realiza la conversión bioquímica de los productos de la Acidogénesis mediante dos mecanismos de reacción: la acetogénesis acetoclástica y la homo-acetogénesis hidrogenotrófica. Mediante el primer mecanismo algunos metabolitos son transformados en acetato e hidrógeno para que puedan ser aprovechados posteriormente por los microorganismos metanogénicos. El segundo mecanismo de reacción implica la síntesis del acetato a través del consumo de hidrógeno y dióxido de carbono.
	Metanogénesis	El metano es producido a partir de ácido acético o de mezclas de hidrógeno y dióxido de carbono, pudiendo formarse también a partir de otros sustratos tales como ácido fórmico y metanol. La mayor parte de la energía libre contenida en el sustrato original se conserva en el metano, por lo que el gas obtenido es altamente energético, dependiendo siempre del porcentaje de metano que éste posea.

Fuente: (Elaboración Propia)

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. Objetivo General**

Determinar la cantidad de energía que se puede obtener a partir de purines bovinos y el uso de bacterias facultativas en el Fundo Huenimiao ubicado en la comuna de La Unión, Región de Los Lagos. Estableciendo si es posible su utilización como combustible en reemplazo de la leña para calefacción residencial.

#### **1.3.2. Objetivos Específicos**

- Realizar un estudio bibliográfico para obtener óptimos datos teóricos de parámetros físico-químicos, microorganismos y relación C/N, en el proceso de digestión anaerobia.
- Caracterizar los desechos bovinos desde el punto de vista físico-químico y determinar las condiciones óptimas teóricas de las mezclas a utilizar en los biodigestores.
- Estudiar la cantidad de leña utilizada para calefaccionar en la Región de Los Lagos, para así conocer la demanda energética del sector donde se emplaza el Fundo Huenimiao.
- Proponer un diseño experimental que, utilizando los volúmenes de residuos estimados, permita obtener el potencial metanogénico de la mezcla de purines con distintas concentraciones de bacterias facultativas a diferentes temperaturas.
- Determinar las tasas de producción de biogás mediante la estimación del volumen de purines bovinos generados en el Fundo Huenimiao.
- Evaluar la factibilidad económica y ambiental del uso de biogás en reemplazo de la leña como método de calefacción, en la comuna de La Unión, Región de Los Lagos.

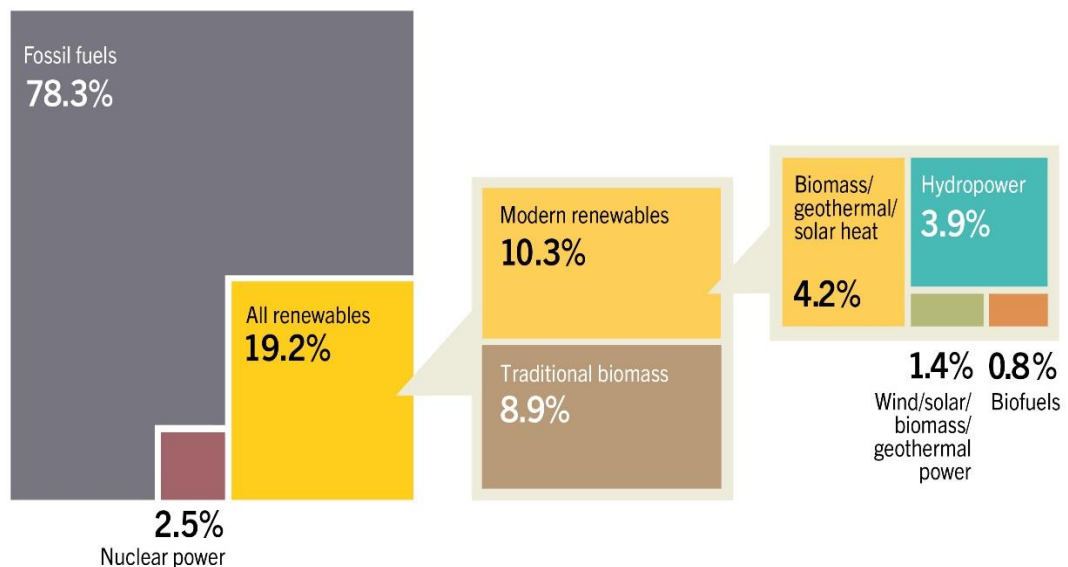
## CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

### 2.1. Situación energética

En la actualidad el tema del cambio climático ha estado muy presente en discusiones internacionales. Uno de los sectores de la economía que presenta las mayores emisiones contaminantes es la industria energética, pero además es el que presenta mayor potencial de abatimiento. Las Energías Renovables No Convencionales (ERNC) constituyen una medida de mitigación para el calentamiento global y al paradigma energético nacional e internacional.

En el siguiente gráfico se puede observar la matriz energética mundial. Las energías renovables, tanto convencionales como no convencionales, representan sólo un 19,2% del total de energía consumida.

Gráfico 1: Matriz Energética Mundial, 2014



Fuente: (Renewables 2014 Global Status Report, 2016)

Es importante señalar que el 8,9% de la energía consumida a nivel mundial proviene de la biomasa tradicional, que corresponde a la leña. Esta cifra sigue

siendo estimativa, debido a la dificultad de censar el uso de ésta. La leña es un recurso que muchas veces no pasa por una transacción de mercado, ya que los consumidores pueden obtenerla directamente del bosque, por tanto se hace imposible saber la cantidad exacta, sólo las registradas por transacciones de mercado. Por tanto, podríamos estar hablando de una cifra mucho mayor.

Al año 2015, se estimó que más de 2.000 millones de personas dependen de la leña para cocinar y/o calentarse, la mayoría de éstas en estufas ineficientes y en espacios mal ventilados, siendo África y Asia los mayores consumidores de leña a nivel mundial. En Latinoamérica sólo el 14% sigue utilizando leña para cocinar a pesar de los problemas a la salud que conlleva su uso. Los que más consumen de este recurso son Brasil y Perú, con 10,4 y 10,3 millones de personas, respectivamente. Cabe destacar que en proporciones esa cantidad corresponde a un 5% del total de la población de Brasil y un 34% de la población de Perú (IEA, 2015).

La leña es un recurso que genera serios problemas ambientales, tanto dentro como fuera de los hogares, y en la actualidad sigue siendo uno de los combustibles más utilizados para calefacción y cocina en lugares agrícolas o vulnerables, donde es difícil y caro acceder a una mejor opción.

Por otro lado, los combustibles fósiles son la principal fuente de energía a nivel mundial. Bajo esta denominación se agrupan el carbón, el petróleo y el gas natural, los cuales generan serios problemas ambientales debido a que su combustión emite Gases de Efecto Invernadero (GEI). Además, se le vinculan otras complicaciones, como los que surgen del transporte de éstos (derrames de petróleo) y los subproductos que originan (hidrocarburos y derivados tóxicos). La excesiva dependencia de este tipo de combustible, junto con la preocupación por la disponibilidad de algunos y su capacidad de hacer frente a la creciente

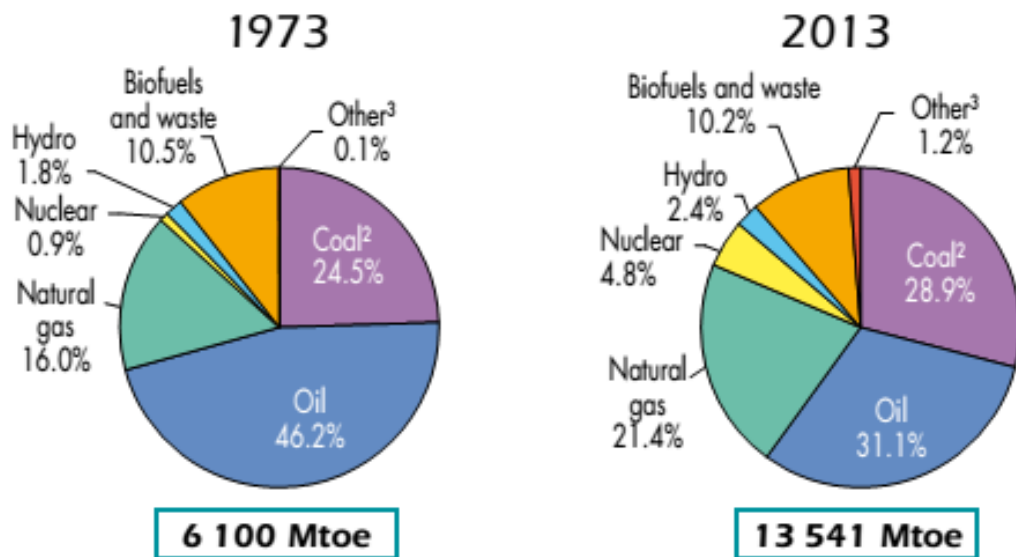
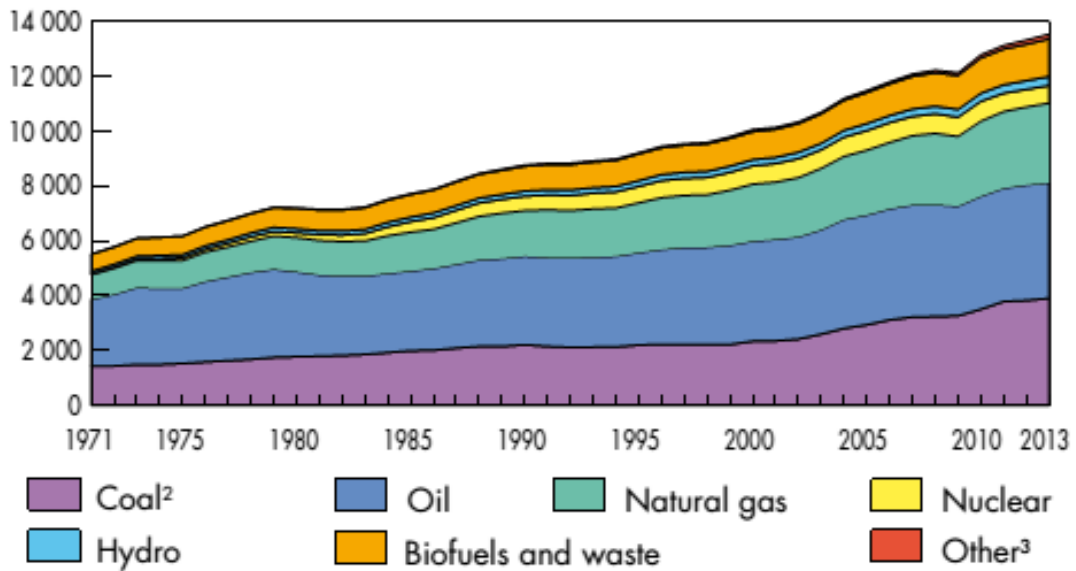
demanda de energía a nivel mundial, revela la necesidad creciente de complementar la matriz energética con energías menos contaminantes y que además sean renovables. Frente a los efectos contaminantes de los combustibles fósiles como el petróleo o el carbón, las energías renovables tienen menos emisiones de carbono y son más respetuosas con el medio ambiente, sin embargo, su sustitución requiere cambios tecnológicos, económicos e institucionales significativos para los países.

A lo largo de los años el aumento de la población mundial ha significado el crecimiento de la demanda de energía, de bienes y servicios. En el Gráfico 2 y 3 se detalla la evolución del suministro de energía primaria por combustible desde el año 1971, diferenciando a los países que están dentro de la OECD (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico).

Se puede observar que el uso del carbón aumenta a medida que se hace necesario obtener mayor energía para desarrollarse, lo mismo sucede con el gas natural. A su vez, se puede apreciar una baja en el consumo de petróleo al año 2013, de un 46,2% a un 31,1%, subiendo el uso de la energía nuclear y, en menor medida, de las energías renovables.

En los países de la OECD también baja el uso de petróleo de un 52,6% a un 35,7%, pero en el caso del carbón ocurre el fenómeno contrario, su uso baja mínimamente y se aumenta en mayor medida el uso de la energía nuclear, los biocombustibles y energía proveniente de los residuos, además de la energía geotérmica, solar, viento, térmica, entre otras. A pesar de esto, actualmente la combustión de energía fósil sigue siendo la principal fuente de energía eléctrica a nivel mundial, como se puede apreciar en el Gráfico 4.

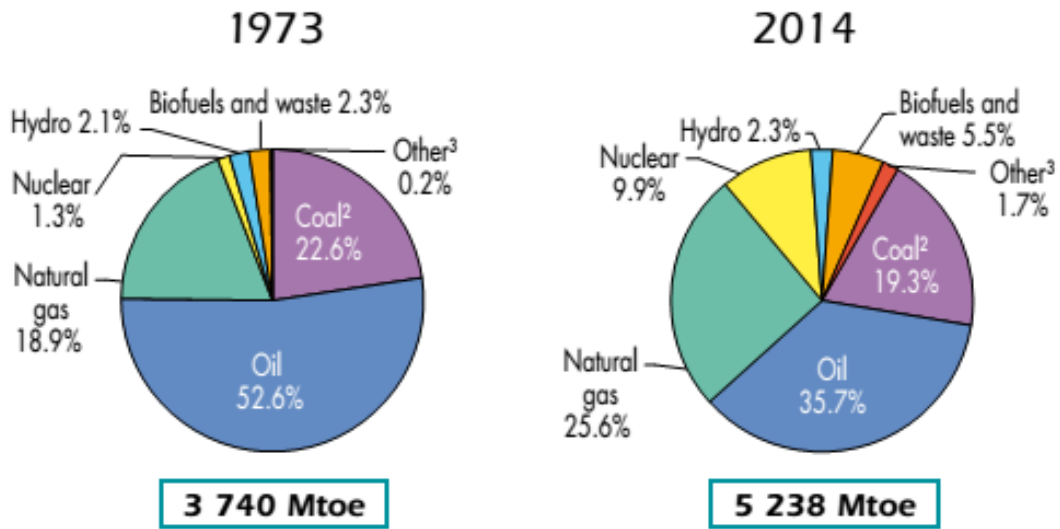
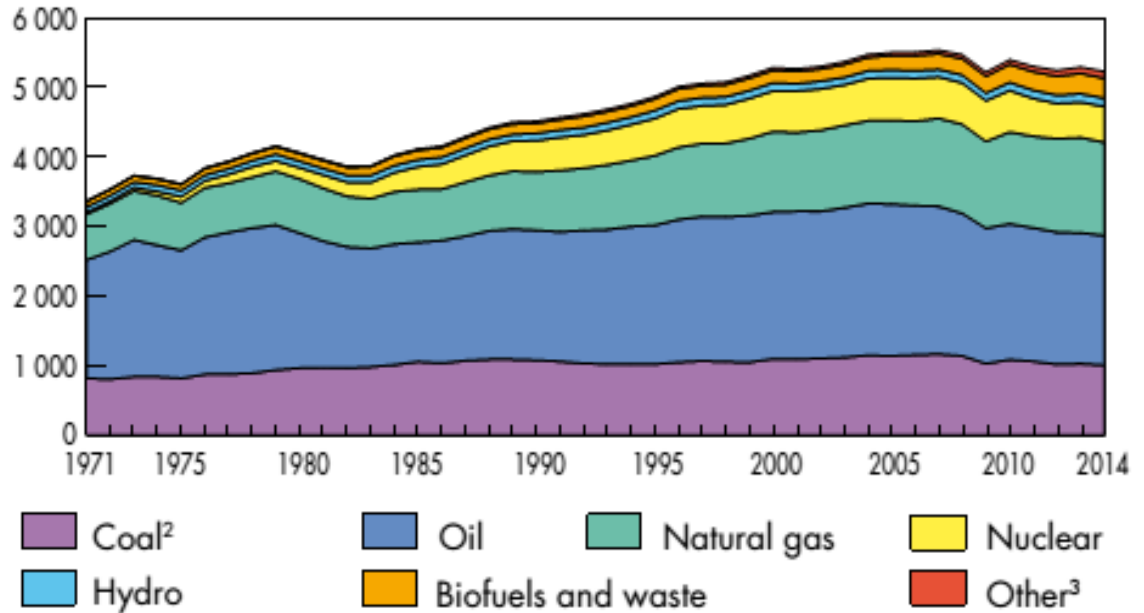
Gráfico 2: Oferta Mundial Total de Energía Primaria<sup>1</sup> desde 1971 al 2013, por Combustible (Mtoe<sup>2</sup>)



Fuente: (Key World Energy Statistics, 2015)

<sup>1</sup>Carbón, Petróleo, Gas Natural, Nuclear, Hidroeléctrica, Biocombustibles y Residuos, Otras (geotérmica, solar, viento, térmica, etc).

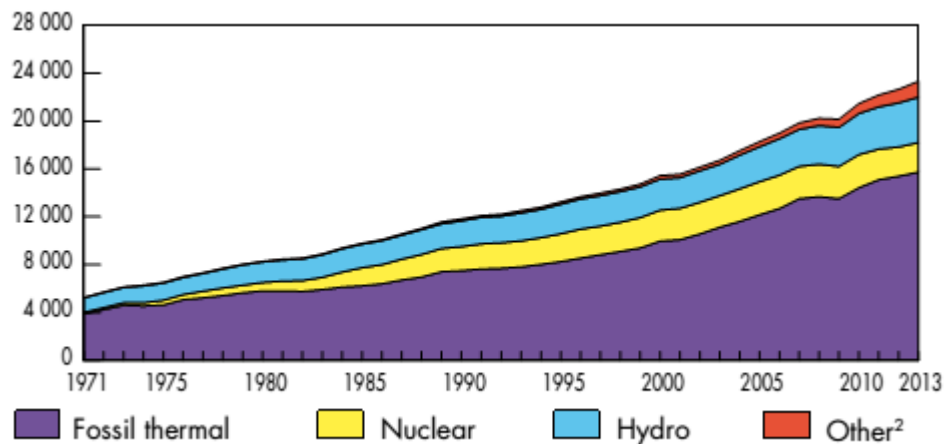
Gráfico 3: Suministro de Energía Primaria Total de la OECD del año 1971 a 2014, por Combustible (Mtoe)



Fuente: (Key World Energy Statistics, 2015)

<sup>2</sup> Millones de toneladas equivalentes de petróleo (Mtoe). Unidad de energía, su valor equivale a la energía que rinde una tonelada de petróleo, donde se ha tomado un valor convencional de 11.630 kWh.

Gráfico 4: Generación Mundial de Electricidad por Combustible, (tWh),



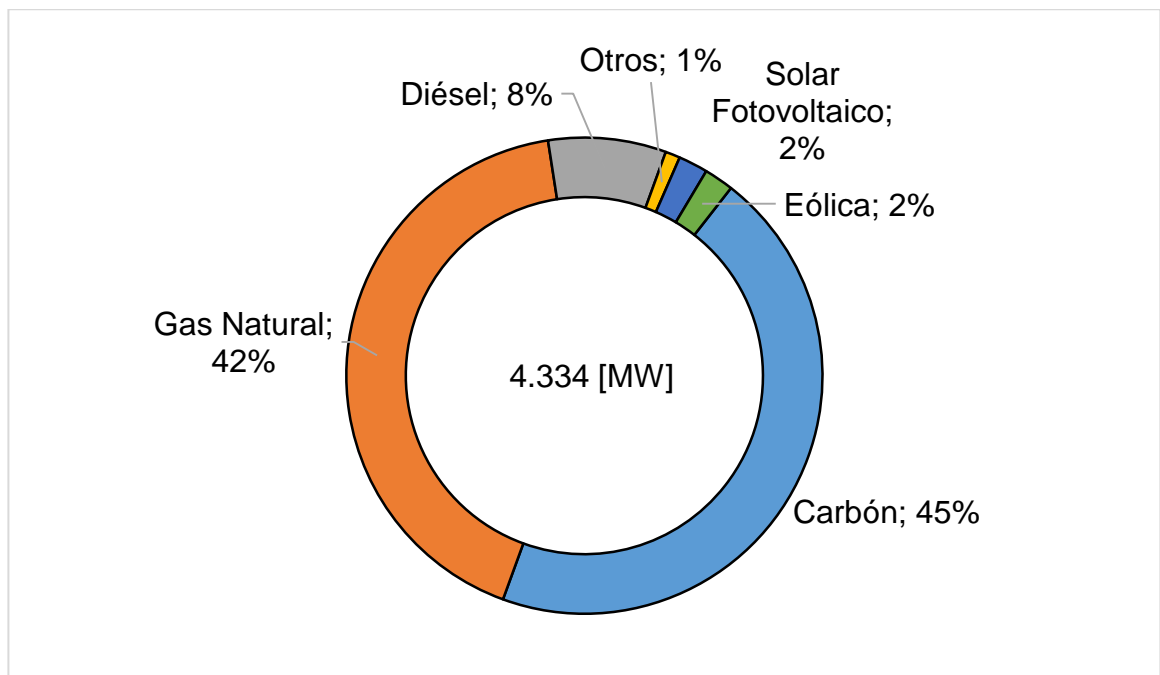
Fuente: (Key World Energy Statistics, 2015)

En el país la situación no es muy diferente a lo señalado anteriormente, actualmente la matriz energética está dominada por combustibles fósiles, tales como el petróleo, el carbón mineral y el gas natural, a lo que se suman grandes represas de generación hidroeléctrica. La carbonización de la matriz, producto del menor costo de este combustible en el mercado, ha significado un aumento sostenido de las emisiones de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) y otros GEI en el país, incrementando la huella de carbono nacional.

Al mes de noviembre del año 2015, la capacidad instalada de generación eléctrica es de 20.337 MW. De éstos, 15.838 MW (77,9%) corresponden al Sistema de Interconectado Central (SIC) y 4.334 MW (21,3%) al Sistema Interconectado del Norte Grande (SING), el restante 0,8% se reparte entre el Sistema Eléctrico de Aysén (SEA) y Magallanes (SEM). Del total nacional de capacidad instalada un 58,2% corresponde a termoelectricidad, 30,0% hidroelectricidad convencional y un 11,8% a Energía Renovable No Convencional (ERNOC) (CNE, 2015).

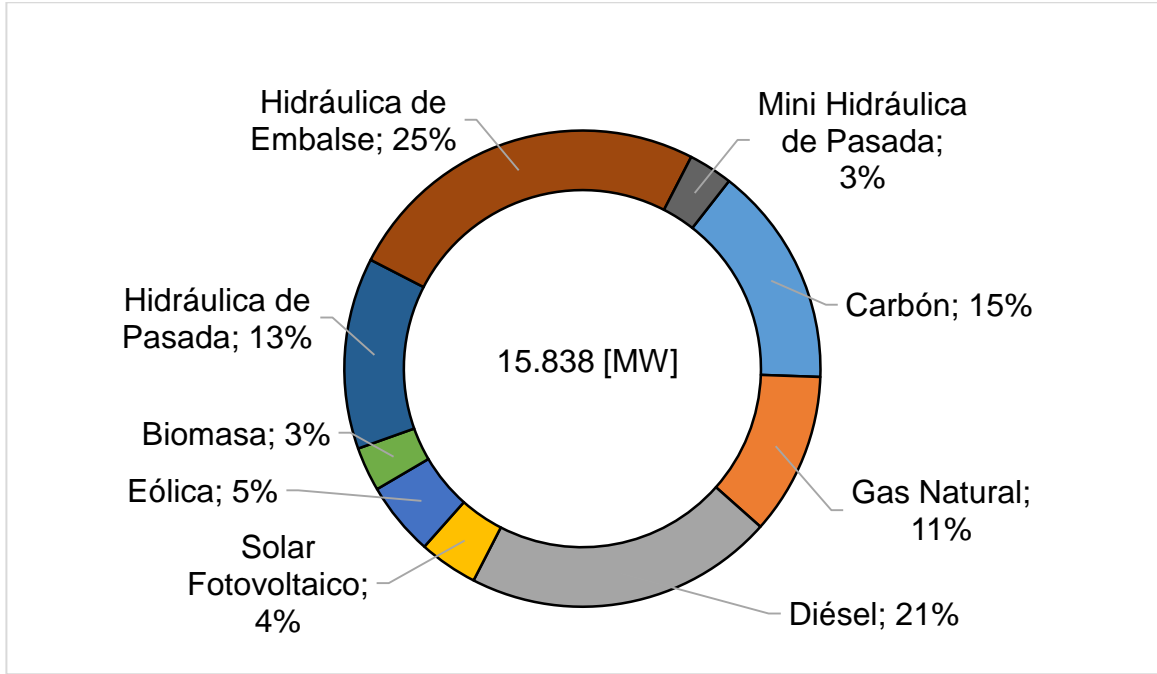
En los Gráficos 5 y 6, se puede observar la capacidad instalada por tecnología en el SING y el SIC (que abarca desde la III Región de Atacama a la X Región de Los Lagos).

Gráfico 5: Capacidad Instalada por Tecnología SING



Fuente: (CNE, 2015)

Gráfico 6: Capacidad Instalada por Tecnología SIC



Fuente: (CNE, 2015)

Como se puede observar, el carbón es parte importante de la matriz energética del país, sobre todo en la zona norte, por lo que se hace necesario buscar nuevas formas de generación de energía, para así des-carbonizar la matriz energética del país y bajar las emisiones de GEI, que son un importante factor del cambio climático.

Por otro lado, el SIC depende bastante de las centrales hidráulicas, tanto las de embalse, como las de pasada. La abundancia de este recurso en gran parte del país y el relieve del territorio permite la explotación de éste. Desde un punto de vista ambiental la energía hidroeléctrica es una de las más limpias, aunque esto no quiere decir que sea totalmente inocua, porque los pantanos que hay que construir suponen un impacto importante. Se destruyen hábitats, se modifica el

caudal del río y cambian características del agua como su temperatura, grado de oxigenación, entre otros.

### **2.1.1. Energías Renovables No Convencionales (ERNC)**

En Chile las ERNC han tomado bastante protagonismo en los últimos años, esto se debe principalmente a dos grandes dificultades que abordan al país. En primer lugar encontramos los efectos del cambio climático, la gente está cada vez más informada y preocupada por los temas ambientales, por tanto los problemas asociados a las centrales de generación de energía basadas en combustibles fósiles hacen que sea necesaria la búsqueda de energías más limpias.

En segundo lugar encontramos la anhelada independencia energética. Uno de los grandes problemas energéticos de Chile es la cantidad de energía que necesita importar, éstas equivalen cerca del 60% de la energía primaria del país (CNE, 2014). Las importaciones durante el mes de marzo 2015 fueron de 2.746 miles de toneladas de combustible, principalmente carbón, petróleo crudo, petróleo diésel y gas natural (CNE, 2015).

Por lo tanto, Chile debe buscar nuevas fuentes que le permitan mejorar esta proporción. El país cuenta con un gran potencial para las ERNC, debido a sus condiciones geográficas y a los recursos naturales que posee, por lo que se hace necesario un mayor protagonismo de ellas dentro del futuro energético. En este contexto la Agenda de Energía publicada en mayo del año 2014, propone levantar las barreras existentes para las ERNC del país, comprometiendo a que un 45% de la capacidad de generación eléctrica que se instale en el país entre los años 2014 a 2025 provenga de este tipo de fuentes. Sin embargo, a pesar de las iniciativas planteadas, también es necesario detener el despilfarro de energía y fomentar el uso eficiente de ésta, a raíz de esto la Agenda de Energía 2014 se establece una meta de ahorro del 20% al año 2025.

Así, Chile ha ido perfeccionando el mercado eléctrico fomentando el desarrollo de las ERNC. Primero en marzo de 2004 se oficializaron cambios significativos a la Ley General de Servicios Eléctricos mediante la Ley 19.940<sup>3</sup>, que modificaron un conjunto de aspectos de dicho mercado que afecta a todos los medios de generación, entre ellos la exención parcial o total del peaje de los sistemas de transmisión para ERNC de pequeña escala. También en 2008 entró en vigencia la Ley 20.257<sup>4</sup>, que estableció la obligación para las empresas eléctricas que efectúan ventas de energía a que acrediten que un porcentaje de la energía comercializada provenga de fuentes renovables. Por último, en el año 2013 se promulga la Ley 20.698<sup>5</sup> que amplía la obligación de acreditación de inyección de ERNC para los generadores, estableciendo como meta al año 2025, el 20% de las ventas de energía en los dos sistemas más importantes del país estuviere cubierta por inyecciones de ERNC. La Ley señaló como obligatoriedad la inyección de un 5% para los primeros años, hasta 2014, y desde 2015 se debe ir aumentando un 0,5%, así, por ejemplo, al año 2015 se debió inyectar un 5,5% y el 2016 un 6%.

Según el balance correspondiente al mes de mayo de 2016, la obligación definida por las leyes 20.257 y 20.698 consistió en 240,32GWh de generación de energía con origen en ERNC. Sin embargo, la inyección reconocida por la ley ascendió a 537,44GWh lo cual corresponde a un 223,63% respecto a lo exigido (CIFES, 2016). Se puede observar en el Gráfico 7 cómo ha aumentado la inyección de

---

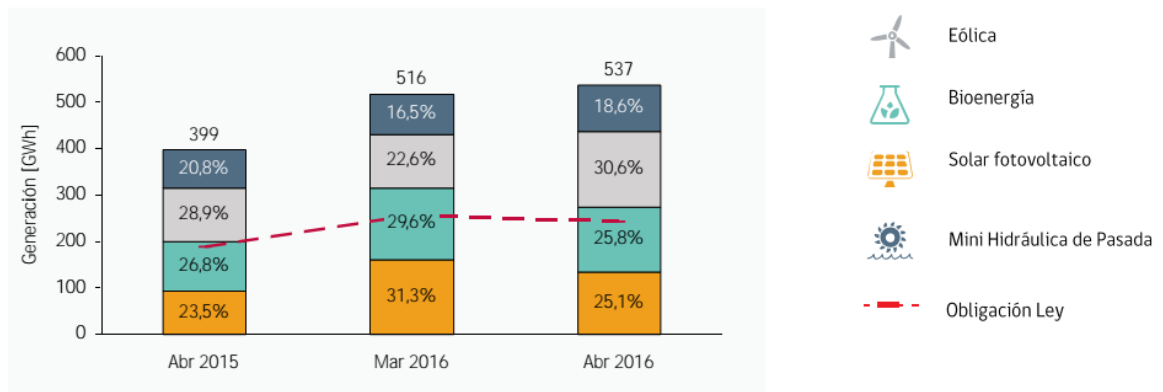
<sup>3</sup>Ley 19.940/2004 (Ministerio de Economía): Regula sistemas de transporte de energía eléctrica, establece un nuevo régimen de tarifas para sistemas eléctricos medianos e introduce las adecuaciones que indica a la ley general de servicios eléctricos

<sup>4</sup>Ley 20.257/2008 (Ministerio de Economía): Introduce modificaciones a la ley general de servicios eléctricos respecto de la generación de energía eléctrica con fuentes de energías renovables no convencionales.

<sup>5</sup>Ley 20.698/2013 (Ministerio de Energía): Propicia la ampliación de la Matriz energética, mediante fuentes renovables no convencionales.

ERNC a la matriz energética, las cifras dan cuenta del interés que han demostrado las diferentes empresas desarrolladoras en las ventajas que tiene nuestro país para la instalación de tecnologías renovables.

Gráfico 7: Cumplimiento de Leyes ERNC por Tecnología



Fuente: (CIFES, 2016)

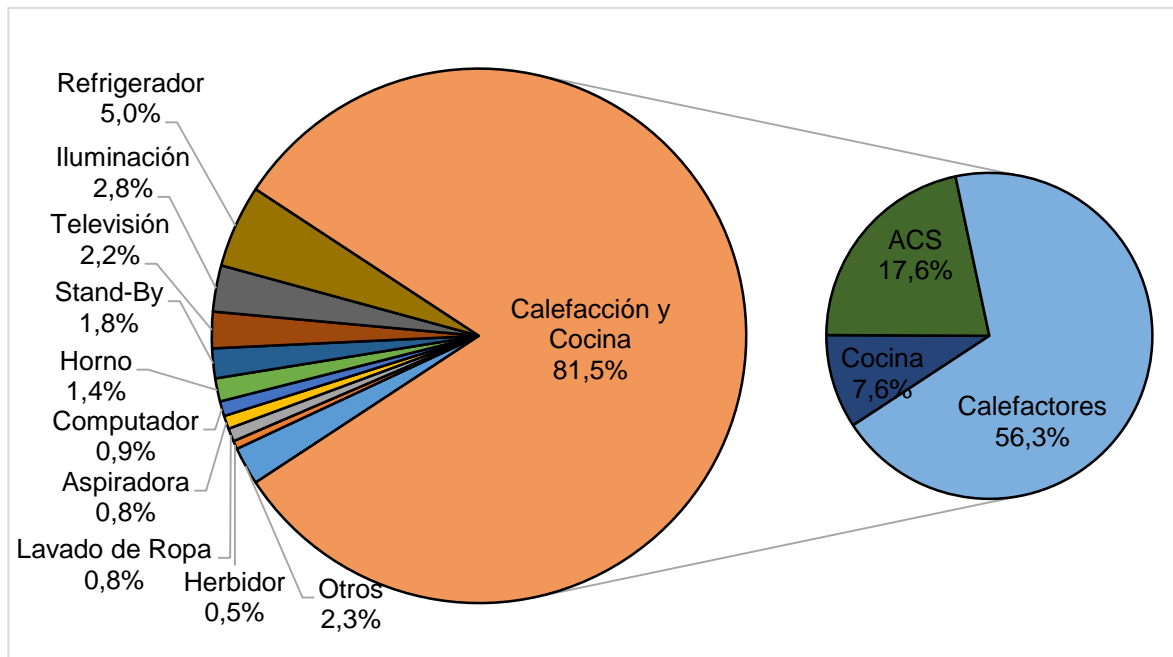
Al 31 de mayo de 2016 la potencia en base a tecnologías de ERNC asciende a un total de 2.523 MW, donde un 88,42% se ubica en el SIC, un 19,53% se encuentra conectado al SING y un 1,05% en el Sistema Eléctrico de Aysén. La capacidad de ERNC instalada corresponde a un 12,24% de la capacidad eléctrica total en los sistemas eléctricos del país.

### 2.1.2. Consumo de Leña en Chile

El uso de la leña en nuestro país representa un 21% del consumo de energía secundaria y es uno de los combustibles más usados para la calefacción. En el Gráfico 8 se puede ver la caracterización energética del sector residencial en Chile, según estudios realizados por la División de Eficiencia Energética del Ministerio de Energía en el año 2013. Se puede ver que el 56,3% de la energía residencial es ocupada para la calefacción, el 17,6% es usada para Agua Caliente Sanitaria (ACS) y el 7,6% para cocina. Además dentro de los combustibles, el

más utilizado es la leña con un 46,6%, seguido por el gas licuado y la electricidad con un 21,4% y 17,6%, respectivamente (CNE, 2014).

Gráfico 8: Caracterización Energética Sector Residencial (Total país)



Fuente: (Ministerio de Energía, 2013)

En la Tabla 2 se puede observar en detalle, los consumos por hogar promedio en m<sup>3</sup>st en las regiones señaladas, alcanzando 14,1 m<sup>3</sup>st<sup>6</sup>. (XIV Región), 17,5 m<sup>3</sup>st (XI Región) y 18,3 m<sup>3</sup>st. (XII Región), esto según un estudio realizado por la Corporación del Desarrollo Tecnológico (CDT) para el Ministerio de Energía en el año 2015.

---

<sup>6</sup>m<sup>3</sup>st. o metro cúbico estéreo trozado o picado: corresponde a una pila de leña circunscrita a un cubo de un metro de largo, 1 metro de ancho y un metro de alto, incluyendo los espacios de aire entre los trozos de leña.

Tabla 2: Consumo Promedio de Leña en Hogares por Región

	N° de Hogares que consumen Leña	Consumo promedio por hogar (m <sup>3</sup> st/año)	Consumo Total (m <sup>3</sup> st/año)
Z. Norte	38.853	1,4	52.762
V Región	100.835	3,0	305.406
RM	145.870	3,0	440.105
VI Región	147.251	3,5	520.882
VII Región	205.185	3,5	727.626
VIII Región	429.041	5,5	2.339.764
IX Región	267.253	7,7	2.068.053
X Región	240.452	13,0	3.116.458,4
XI Región	31.314	17,5	549.491,1
XII Región	6.032	18,3	110.444,5
XIV Región	108.945	12,1	1.539.683,3
Total	1.721.032	6,8	11.770.675,3

Fuente: (CDT, 2015)

El consumo de la leña residencial aumenta a medida que se avanza hacia el sur del país. Las temperaturas de esas regiones influyen notablemente, ya que la calefacción se utiliza por más horas/día y se busca, principalmente, lo más económico y efectivo. En la X Región de Los Lagos, donde se encuentra ubicado el lugar de estudio, se consumen 13 m<sup>3</sup> de leña al año por hogar. Una cantidad considerable si se compara con las regiones de la zona centro del país. En la Tabla 2 se puede observar la cantidad de leña mensual que se ocupa, en promedio, por hogar en la Región.

Tabla 3: Consumo Promedio de Leña Sector Residencial por mes

Mes	Consumo leña (m <sup>3</sup> /mes)
Enero	0,39
Febrero	0,56
Marzo	1,07
Abril	1,28
Mayo	1,28
Junio	1,28
Julio	1,28
Agosto	1,28
Septiembre	1,28
Octubre	1,28
Noviembre	1,10
Diciembre	0,92
TOTAL (m <sup>3</sup> /año)	13

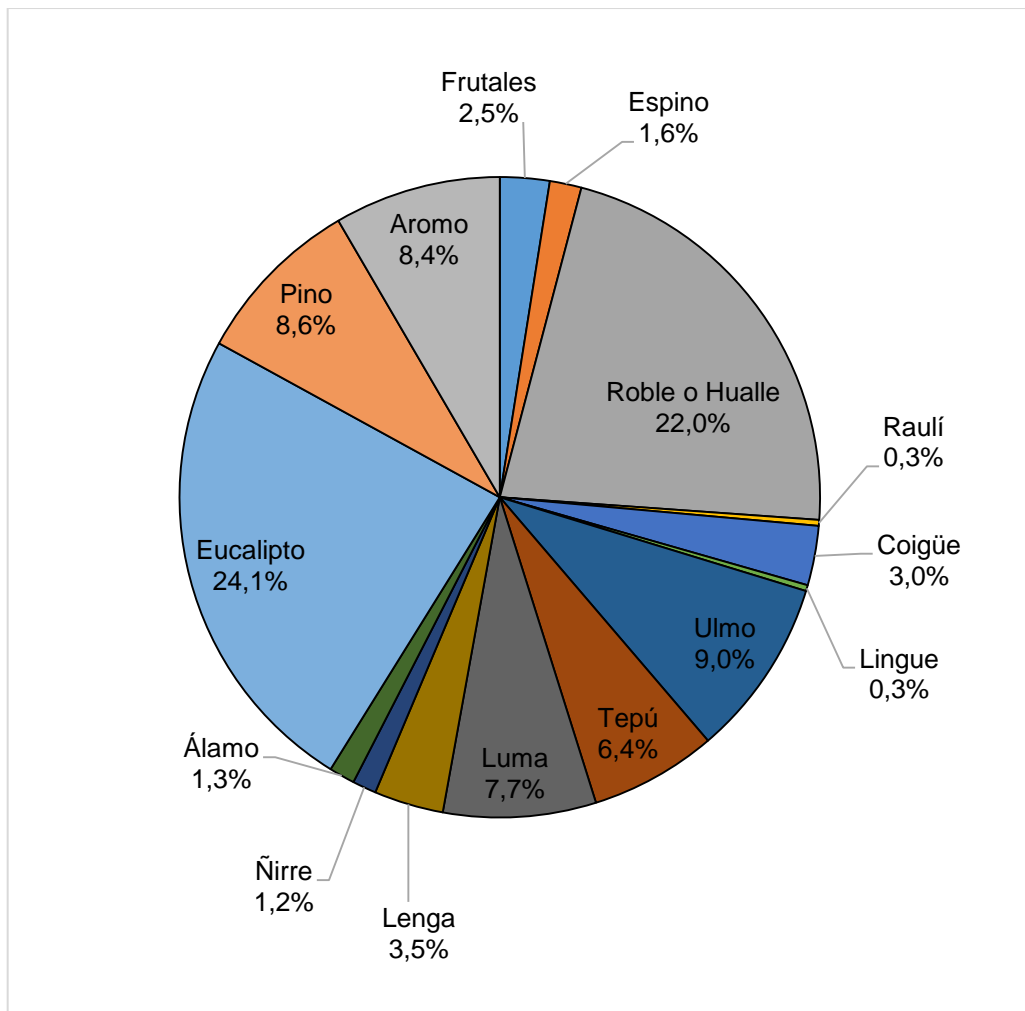
Fuente: (Elaboración Propia) (de acuerdo a datos obtenidos por la Corporación del Desarrollo Tecnológico, 2015)

Por otro lado, en el sector residencial es posible apreciar que las especies de leña más consumidas a nivel nacional corresponden al Eucalipto, seguido por el Roble y el Pino, como se observa en el Gráfico 9. Las especies poseen diferente poder calorífico, llegando a diferencias del 100% en su capacidad para producir calor. El espino, los frutales, el eucalipto, el aramo y el ulmo son especies arbóreas que se comercializan como leña que más aportan poder calorífico, por lo tanto su rendimiento al interior de los hogares es mucho mayor.

En la Tabla 4 se detalla el poder calorífico por especies, la especie con mayor poder calorífico es la madera de Luma, con un 1,68 Gcal/m<sup>3</sup> cuando está seca. La leña seca es aquella con un contenido de humedad menor o igual al 25%, aumenta el rendimiento, ahorrando así dinero, y emite menos contaminantes. La leña verde, o recién cortada, es aquella cuyo contenido de humedad está por sobre el 50%, disminuye el rendimiento ya que la mitad del calor se pierde en

evaporar el agua. Como se puede ver la madera con mayor porcentaje de humedad baja considerablemente su poder calorífico.

Gráfico 9: Distribución del Volumen Consumido por Especie en el Sector Residencial



Fuente: (CDT, 2015)

Tabla 4: Tabla de Poder Calorífico según Especies

Especie	Energía (Gcal/m <sup>3</sup> ) 25% de humedad	Energía (Gcal/m <sup>3</sup> ) 50% de humedad
Luma	1,68	0,99
Eucaliptos	1,18	0,70
Aromo	1,18	0,70
Coihue	1,08	0,66
Roble	0,99	0,60
Canelo	0,92	0,55

Fuente: *(Sistema Nacional de Certificación de Leña, 2015)*

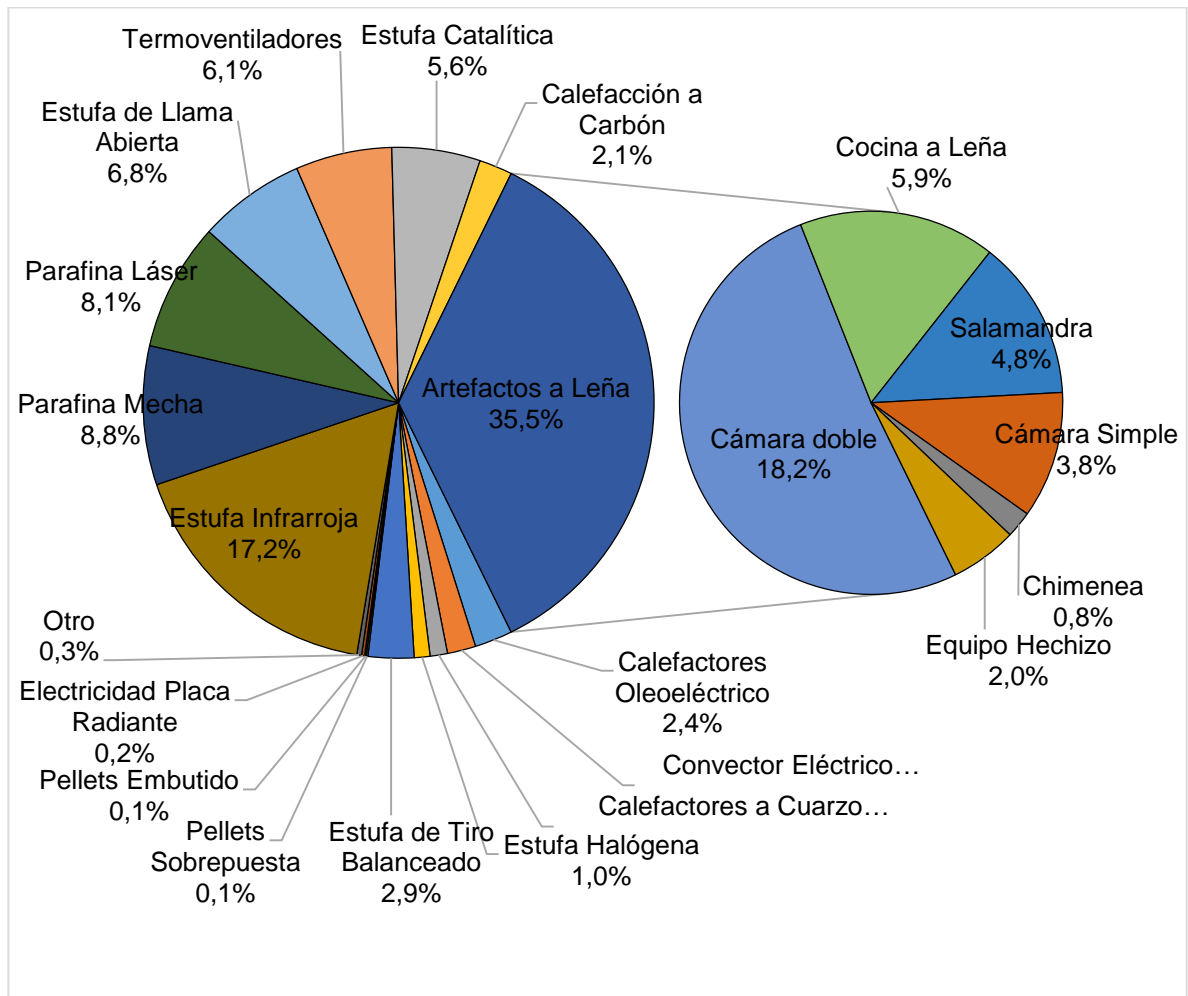
Como se puede apreciar en el Gráfico 10 casi el 50% de los aparatos que utilizan leña como combustible son de menor eficiencia. En primer lugar se encuentra el calefactor de cámara doble con un 18,2%, seguido por la salamandra y el calefactor de cámara simple, con un 4,8% y 3,8% respectivamente.

El problema principal en la combustión residencial de leña se debe a la dificultad en controlar todas las fuentes de emisión para que operen en condiciones correctas, ya que aun cuando los equipos de combustión fueran los adecuados y la leña estuviera en óptimas condiciones de humedad, la operación de los artefactos influye notablemente en la calidad de las emisiones. En 2012 se aprobó la Ley 20.586<sup>7</sup> del Ministerio de Energía con el fin de regular la certificación de los artefactos de combustión a leña y por esta vía mejorar la calidad del aire en los centros urbanos, sobre todo en el sur del país, por esta razón el artefacto que más se utiliza es el calefactor de cámara doble.

---

<sup>7</sup> Ley 20.586/2012 (Ministerio de Energía): Regula la Certificación de los Artefactos para Combustión de Leña y otros productos Dendroenergéticos.

Gráfico 10: Artefactos de Calefacción Utilizados en los Hogares a Nivel Nacional



Fuente: (CDT, 2015)

### 2.1.2.1. Costos de la energía utilizada para métodos de calefacción

Si bien en la actualidad existen diversas alternativas a usar como métodos de calefacción además de la leña, el costo de éstas en comparación es mucho mayor. Por esta razón la leña sigue siendo la mejor opción, debido a su bajo costo y al arraigo cultural existente, sobre todo en las zonas rurales del país.

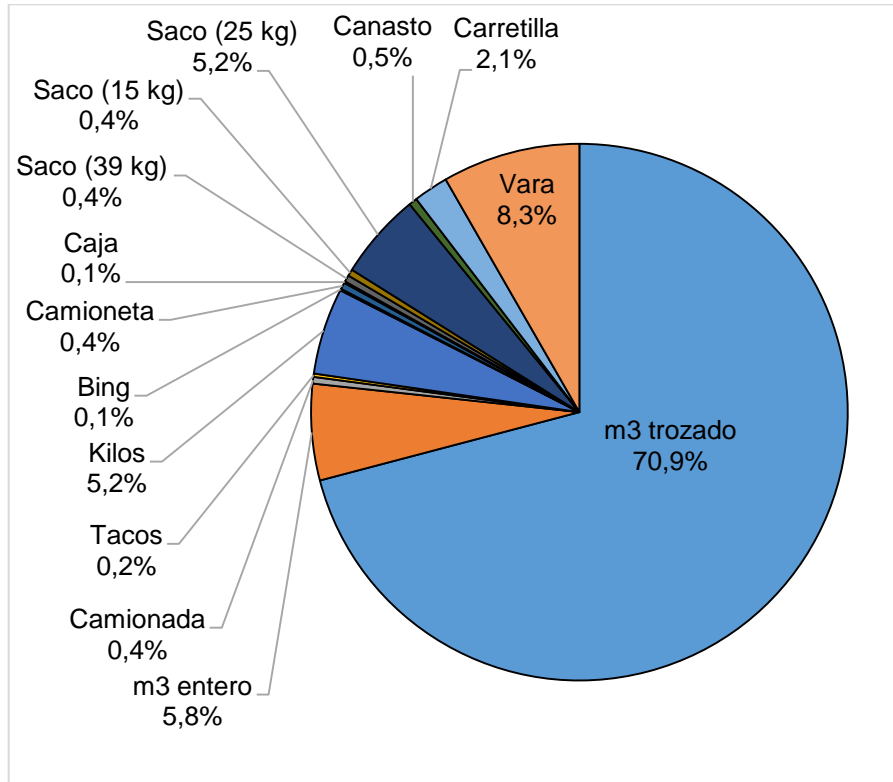
Dentro de la economía campesina la leña juega un rol fundamental, la venta de leña representa un importante aporte a los ingresos prediales. Existen casos en donde se acude al ingreso que genera el bosque en situaciones de necesidad y otros donde la explotación del bosque constituye la principal fuente de ingresos.

Un problema fundamental son los precios de este combustible, muchas veces son los comerciantes de leña los que fijan los precios en zonas rurales en las que el productor se ve obligado a vender su leña a un precio preestablecido, el que muchas veces no refleja en absoluto los precios de producción.

Desde la perspectiva del ingreso en los hogares los consumos de leña, gas y electricidad difieren en la medida que aumenta el ingreso, ya que si estos aumentan se tiende a reemplazar el uso de la leña, sobre todo en zonas urbanas. Respecto al consumo de la leña, la tendencia a nivel rural y urbano, es clara en cuanto a que, a medida se sube el ingreso, disminuye el porcentaje de hogares que utiliza leña. La tasa de disminución del consumo de leña en los hogares urbanos es mucho mayor a la tasa de disminución en los rurales. Otra particularidad importante es la diferencia en la cantidad de hogares que utilizan leña, el promedio rural es de un 83,6% y el urbano 28,7% (Martínez Martínez, 2014). Por lo que se puede concluir que la leña es el combustible más accesible para los estratos socioeconómicos bajo y medio.

Los precios entre una y otra especie no varía mucho, estando entre los \$2.500 y \$3.000 el saco de leña trozada de 25 kg; y entre los \$30.000 y \$39.000 el metro cúbico st. Esto depende del lugar de distribución, por lo general el valor aumenta en los lugares que están certificados (SERNAC & SEREMI del Medio Ambiente, 2016).

Gráfico 11: Unidad de Venta de Leña a Nivel Nacional en el Sector Residencial



Fuente: (CDT, 2015)

El formato de leña más consumido por el sector residencial es el metro cúbico st., seguido de la venta en formato “vara”, el saco de 25 kg y por kilos.

## 2.2. Problema ambiental Región de Los Lagos

La zona sur del país ha sido afectada a gran escala por la contaminación atmosférica. A diferencia de los que sucede en la Región Metropolitana, donde el principal emisor de partículas contaminantes es el tráfico, en las regiones el problema es con la calefacción a leña. La región manifiesta su desarrollo con la explotación de sus recursos naturales, tanto renovables como no renovables, lo

que ha significado una serie de conflictos ambientales. Encontramos los siguientes:

- Irrracional explotación y destrucción de bosques nativos.
- Sobreexplotación de fauna marina, especialmente parte de barcos factoría.
- Deficiente disposición y tratamiento de residuos sólidos domésticos e industriales.
- Deterioro por sobreexplotación de los recursos hidrobiológicos/pesqueros.
- Contaminación de los recursos hídricos de ríos, lagos, mar y aguas subterráneas por residuos sólidos y líquidos de origen doméstico, industrial y agropecuario.
- Excesivo uso de la vegetación para consumo de leña, especialmente especies forestales nativas.
- Contaminación y deterioro del medio ambiente urbano, entre otros.

La contaminación atmosférica es el principal desafío para la autoridad ambiental en Chile, en la Región de Los Lagos, específicamente en Osorno, las cifras son alarmantes, ubicando a la ciudad en el primer lugar del ranking de las siete localidades con los mayores niveles de contaminación del país en 2012, según un estudio realizado por el Centro de sustentabilidad de la Universidad Andrés Bello. En comparación con la Región Metropolitana donde los días de alerta ambiental llegan a 9, en Osorno llegan a los 23. La principal fuente emisora es la combustión de leña para calefacción domiciliaria.

A raíz de esto, el 29 de abril de 2016 se lleva a cabo el lanzamiento del Plan de Descontaminación atmosférica de Osorno. Las medidas que se toman son acondicionamiento térmico de viviendas, mejoramiento de calidad de la leña, recambio de calefactores y educación ambiental. A raíz de esto se crean dos programas para apalejar el problema ambiental, el Programa de Recambio de

Calefactores y el Programa de Educación Ambiental, las que cuentan con financiamiento del Gobierno Regional de Los Lagos. Si bien no se prohíbe el uso de leña, se recomienda usar leña seca y se llevan a cabo medidas para que sea la única que se comercialice, los comerciantes deben medir e informar la humedad de la leña y se estimulará para que aumente la oferta de leña seca y formal, difundiendo mensualmente a los comerciantes de leña formal. Además se fomentarán los proyectos de inversión orientados a generación de Energías Renovables y se prohíbe el uso de chimeneas hogar abierto, uso de artefactos unitarios en edificios residenciales y condominios sociales nuevos, y el uso de calefactores a leña que no cumpla con la norma de emisión (a contar de 2024).

Dentro de las instalaciones agroindustriales se puede cubrir gran parte de las necesidades energéticas a partir de sus propios residuos, por lo que la producción de energía a partir de sustratos biológicamente degradables representa una excelente alternativa para la sustitución de combustibles fósiles no renovables que se utilizan en la actualidad. El biogás producto de la biodigestión anaerobia emerge como una solución potente en el tratamiento de los residuos agroindustriales.

### **2.3. Co-Digestión anaerobia**

El co-tratamiento consiste en el tratamiento conjunto de residuos orgánicos diferentes, con el objetivo de aprovechar la complementariedad de las composiciones, permitiendo así perfiles de proceso más eficaces, y también amortiguar las variaciones temporales en composición y producción de cada residuo por separado.

Se ha comprobado que la co-digestión de residuos de la producción de aceite de oliva virgen y estiércol de bovino hace posible el tratamiento del primero, aumentando a su vez la producción de biogás del estiércol (Angelidaki & Ahring,

1997). La mezcla de purines de cerdo ha mostrado buenos resultados en otros estudios, llegando a niveles de eliminación de la DQO del orden del 65% (Schmidt, Angelidaki, & Ahring, 1999). También han obtenido mejoras en las producciones de biogás con mezclas de purines o estiércol bovino y restos vegetales (Dar & Tandon, 1987), con mezclas de residuos de tomates (Trujillo, Pérez, & Cebreros, 1993), con mezclas de residuos de frutas y verduras (Callaghan, Wase, Thayanithy, & Forster, 1999), o con mezclas de la industria láctea (Gavala, Skiadas, Bozini, & Lyberatos, 1996). Las combinaciones posibles son considerables.

### **2.3.1. Sistemas de tratamiento anaerobio**

Los diseños utilizados para digestión anaerobia pueden clasificarse en función de su capacidad para mantener altas concentraciones de microorganismos en el reactor. El reactor más simple es el de mezcla completa, y es el más utilizado para residuos.

- **Sistema Batch:**

Se caracterizan por una carga y vaciado total de la cámara de digestión. Su curva de producción de gas sigue la característica arranque-estabilización-agotamiento. Esto obliga a fin de mantener una producción de gas estable a lo largo del tiempo a poseer por lo menos tres o cuatro digestores de este tipo, cada uno de los cuales se hallará operando en las distintas etapas. Lo que permite mantener la producción de biogás en un cierto nivel uniforme.

Este tipo de digestores son eficaces para la digestión de materiales celulósicos que no pueden ser tratados en los digestores de tipo continuo debido al posible taponamiento de los conductos de alimentación y salida. Su utilización no está muy difundida.

- **Sistema continuo o semicontinuo:**

En este tipo de digestores el volumen que ingresa desplaza una cantidad equivalente de efluente que se evacua por la salida. De este modo el volumen del substrato en la cámara de digestión se mantiene constante. Los continuos se cargan generalmente en forma diaria, a diferencia de los semicontinuos, se descargan totalmente uno o dos veces por año que generalmente coincide con el período de siembra para aprovechar el poder fertilizante del digestato, parte de éste se utiliza en el nuevo arranque.

El tiempo de permanencia de la biomasa dentro del digestor estará dado por el cociente entre el volumen de la cámara de digestión y el de la carga diaria. Dicho valor no es exacto debido a que la parte del material introducido puede salir en un periodo más corto, lo que se trata de minimizar mediante un adecuado diseño de la cámara.

La mayor parte de los digestores difundidos a lo largo de todo el mundo pertenecen a esta categoría y existen dentro de ella enormes variaciones sobre el mismo principio.

### **2.3.1.1. Factores que influyen en el proceso**

- **pH y alcalinidad**

El pH juega un papel importante dentro de la digestión anaerobia, ya que está asociado a la ocurrencia de fenómenos de acidificación, que afectan negativamente el proceso (Torres y Pérez, 2008). En algunas aguas residuales con bajo poder tampón puede llegar a ser necesario controlar exteriormente el pH, a fin de evitar su bajada debido a los ácidos generados en la segunda fase. No es así para los residuos ganaderos, para los cuales su alcalinidad permite una autorregulación permanente de pH. Se trabaja en todos los casos alrededor de la neutralidad.

En cada fase del proceso los microorganismos presentan máxima actividad en un rango de pH diferenciado: hidrolíticos entre 7,2 y 7,4; acetogénicos entre 7 y 7,2 y metanogénicos entre 6,5 y 7,5. El mantenimiento del pH es de vital importancia el sistema formado por las diferentes formas del carbono orgánico, en equilibrio (dióxido de carbono, bicarbonato, carbónico).

Por lo anterior, se admite que una alcalinidad comprendida entre 2 y 3  $\text{CaCO}_3/\text{L}$  es suficiente para la autorregulación del pH en el reactor.

- **Potencial redox**

Debe ser suficientemente bajo para asegurar el desarrollo de poblaciones metanogénicas estrictas, que requieren potenciales de oxidación-reducción comprendidos entre -300mV y -330mV.

- **Nutrientes**

Una de las ventajas del proceso anaeróbico es su baja necesidad de nutrientes como consecuencia de su pequeña velocidad de crecimiento. El carbono y el nitrógeno son las principales fuentes de alimento de las bacterias metanogénicas, por lo que la relación carbono/nitrógeno (C/N) tiene gran importancia. La relación C/N debe estar comprendida entre 15/1 y 45/1, sin embargo, es recomendable un valor de 20/1 a 30/1. Valores muy inferiores disminuyen la velocidad de reacción y valores muy superiores crean problemas de inhibición.

Para el fósforo la relación óptima es C/P=150/1. En general, los residuos ganaderos no presentan problemas por falta de nutrientes.

- **Temperatura**

A medida que aumenta la temperatura, aumenta la velocidad de crecimiento de los microorganismos y se acelera el proceso de digestión, dando lugar a mayores producciones de biogás. Puede realizarse a tres rangos diferentes de temperatura: psicrófilo: por debajo de 20°C; mesófilo, entre 30°C y 40°C; y termófilo, entre 50°C y 70°C.

Trabajando en el rango termófilo se asegura la destrucción de patógenos, la eliminación de malas hierbas y de huevos y larvas de insectos, por lo cual se presenta interés para el tratamiento de residuos que han de ser aplicados al suelo y a cultivos que requieran un cierto grado de higienización. Sin embargo, estos requieren mayor control y seguimiento, debido a que a altas temperaturas el nitrógeno amoniacal se comporta como inhibidor. Esto puede soslayarse mediante mezclas de residuos de diferente origen para disminuir la concentración de nitrógeno.

- **Estabilidad, toxicidad e inhibición**

Las formas no ionizadas de los ácidos grasos volátiles, así como el amoníaco libre o el ácido sulfhídrico son inhibidores de importancia de las bacterias metanogénicas. Estos compuestos presentan una inhibición de tipo reversible. Los metales pesados también son inhibidores, o tóxicos a altas concentraciones.

La aclimatación de las poblaciones bacterianas juega un papel importante en el momento de definir concentraciones críticas, así como el efecto sinérgico o antagónico que la presencia de una sustancia puede tener sobre la actividad tóxica de otra.

Para residuos ganaderos en general, los compuestos críticos son el nitrógeno amoniacal, los antibióticos y los desinfectantes, así como el cobre y el zinc para

residuos de porcino. Se ha comprobado que concentraciones de Spyramicina<sup>8</sup> de 50 mg/L en los residuos puede provocar una disminución del 56% en la producción de gas, mientras que otros antibióticos se han mostrado inactivos. Los desinfectantes son mucho más activos, llegando a provocar disminuciones en la producción del 90% a bajas concentraciones (Hilper, Winter, & Kandler, 1982).

- **Otros parámetros**

Otros parámetros, tales como tiempo de retención o agitación, dependen del tipo de reactor adoptado y de las características del sustrato.

### **2.3.1.2. Ventajas y desventajas del tratamiento**

Por el principio de conservación de la materia, en un reactor anaerobio la cantidad eliminada de DQO se convierte en gas. Por este principio, la cantidad máxima de metano producible es de 0,35m<sup>3</sup>/Kg por DQO eliminada, en condiciones normales de presión y temperatura, y en unidades de energía primaria del orden de 3,5 kWh/kg por DQO eliminada (Flotats, Campos, & Bonmatí, 1997). Esto confiere a los sistemas anaerobios una clara ventaja frente a los sistemas aerobios de tratamiento de residuos orgánicos y aguas residuales.

Por tanto, los sistemas anaerobios presentan ventajas e inconvenientes, que se sintetizan a continuación:

---

<sup>8</sup>Antibiótico del grupo de los macrólidos, como eritromicina y la claritromicina, que actúan impidiendo el crecimiento bacteriano.

Tabla 5: Ventajas y Desventajas de la Digestión Anaerobia

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Permite generar energía limpia, reduciendo la emisión de metano evitando el deterioro de la capa de ozono.</li> <li>- Ofrece un tratamiento a los residuos orgánicos contaminantes.</li> <li>- El biogás puede ser utilizado en la propia instalación para generación de electricidad y/o calor; con el consiguiente beneficio económico.</li> <li>- La materia orgánica resultante (digerido) está bastante estabilizada y puede utilizarse como fertilizante.</li> <li>- Se puede trabajar conjuntamente con varios subproductos.</li> <li>- Balance energético positivo y mucho más favorable que otros sistemas biológicos de eliminación de materia orgánica.</li> <li>- Producción de fangos (residuos) muy inferior a los sistemas aerobios, para el tratamiento de aguas residuales.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Los microorganismos son muy sensibles a los cambios ambientales que se puedan producir durante el proceso.</li> <li>- La baja tasa de multiplicación de las bacterias involucradas y las bajas tasas de conversión del substrato en biomasa bacteriana. El proceso es lento, necesitándose varias semanas, incluso meses, de puesta en marcha para conseguir un equilibrio estable.</li> <li>- Producción de malos olores debido a la generación de sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S) y amoníaco (NH<sub>3</sub>) en el biogás. Además este compuesto es bastante corrosivo y puede dañar los equipos.</li> <li>- Por ser sistemas cerrados, estancos, y con la necesaria infraestructura para el control y aprovechamiento del gas producido, requiere inversiones elevadas.</li> <li>- Debido al necesario equilibrio entre poblaciones bacterianas, es necesario un cierto grado de control.</li> </ul>

Fuente: (Elaboración Propia)

### 2.3.1.3. Productos finales del tratamiento anaerobio

Los principales productos del proceso de digestión anaerobia, trabajando en sistemas de alta carga orgánica y en mezcla completa, son el biogás y un efluente estabilizado llamado digestato.

El biogás es una mezcla gaseosa formada principalmente por metano (CH<sub>4</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y pequeñas proporciones de otros gases que se detallan en la Tabla 5.

Tabla 6: Componentes del biogás en función del sustrato utilizado

Componente	Residuos Agrícolas	Lodos de depuradora	Residuos Industriales	Gas de vertedero
Metano (CH <sub>4</sub> )	50-80%	50-80%	50-70%	45-65%
Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	30-50%	20-50%	30-50%	34-55%
Agua	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado
Hidrógeno	0-2%	0-5%	0-2%	0-1%
Sulfuro de Hidrógeno	100-700 ppm	0-1%	0-8%	0,5-100 ppm
Amoníaco	Trazas	Trazas	Trazas	Trazas
Monóxido de Carbono (CO)	0-1%	0-1%	0-1%	Trazas
Nitrógeno	0-1%	0-3%	0-1%	0-20%
Oxígeno	0-1%	0-1%	0-1%	0-5%
Compuestos Orgánicos	Trazas	Trazas	Trazas	5 ppm

Fuente: (Coombs, 1990)

La composición o riqueza del biogás depende del material digerido y del funcionamiento del proceso. El potencial calórico inferior del biogás es aproximadamente 5.250 kcal/m<sup>3</sup>, para una riqueza de metano del 60%.

Según datos obtenidos en bibliografía los residuos bovinos producen más biogás en comparación con otros ganados. En las tablas siguientes podemos ver la producción de biogás por residuo de animal según diversos autores, coincidiendo todos que la calidad de biogás del residuo bovino es de 60-65% de metano (CH<sub>4</sub>).

Tabla 7: Producción de biogás por residuo animal

Estiércol	Volumen de biogás	
	m <sup>3</sup> /kg húmedo	m <sup>3</sup> /día
Bovino (500 kg)	0,04	0,400
Porcino (50 kg)	0,06	0,135
Aves (2 kg)	0,08	0,014
Ovino (32 kg)	0,05	0,075
Caprino (50 kg)	0,05	0,100
Equino (450 kg)	0,04	0,400
Conejo (3 kg)	0,06	0,021

Fuente: (Varnero y Arellano, 1990)

Tabla 8: Producción de biogás unitaria

Bovinos	Producción m <sup>3</sup> /animal por día
Grande	0,6
Mediano	0,4
Pequeño	0,32
Ternero	0,16

Fuente: (Martínez, 2007)

Por otro lado, se obtiene de este proceso un efluente rico en nutrientes llamado digestato. Éste depende mucho del sistema, pero tratando con sistemas de mezcla completa y con residuos orgánicos, se puede decir que el digestato es la mezcla del efluente estabilizado y la biomasa microbiana producida. Durante el proceso anaerobio parte de la materia orgánica se transforma en metano, por lo que el contenido en materia orgánica es menor que en el efluente. Se trata, además, de un producto mineralizado, con lo que normalmente aumenta el contenido de nitrógeno amoniacal y disminuye el nitrógeno orgánico.

Cuando el estiércol animal se usa como sustrato en los biodigestores, como es el caso de esta investigación, el efluente líquido puede ser utilizado como fertilizante debido a aspectos como son la disminución de la relación C/N y la solubilización de algunos nutrientes.

#### **2.4. Impactos medioambientales de los purines**

A diferencia de las industrias, la agricultura se ha visto libre durante mucho tiempo de ser considerada como una actividad con capacidad de producir impactos en el medio ambiente. Esto debido a que se trata de una actividad que trabaja con insumos naturales y que carece de chimeneas que emitan gases contaminantes a la atmósfera, sin embargo los residuos que genera puede contaminar el suelo y también emitir GEI.

Los residuos agrarios son los residuos generados en el entorno natural y lo integran un grupo heterogéneo de productos compuestos por plantas, o parte de ellas, que es preciso separar para obtener el fruto, o el propio producto agrícola. También comprende los residuos animales generados en las explotaciones ganaderas intensivas.

Gran parte del problema es el elevado volumen que se produce y su efecto contaminante.

##### **3.1.1. Impactos ambientales en la atmósfera**

La descomposición del estiércol bajo condiciones anaerobias durante su almacenamiento y tratamiento producen metano (CH<sub>4</sub>). Estas condiciones se dan más fácilmente cuando se gestionan grandes cantidades de animales en una superficie confinada, y donde se elimina el estiércol en sistemas basados en

líquidos. Se declaran las emisiones de CH<sub>4</sub> relacionadas con el manejo y el almacenamiento del estiércol bajo “Gestión del Estiércol”.

Los principales factores que inciden en las emisiones de CH<sub>4</sub> son la cantidad de estiércol que se produce y la porción que se descompone anaeróbicamente. La primera depende de la tasa de producción de desechos por animal y de la cantidad de animales, mientras que la segunda depende de cómo se gestiona el estiércol. Cuando el estiércol se almacena o se procesa como líquido (por ejemplo en lagunas, estanques, tanques o pozos), se descompone anaeróbicamente y puede producir una cantidad significativa de CH<sub>4</sub>. La temperatura y el tiempo de retención de la unidad de almacenamiento son dos factores que inciden significativamente en la cantidad de CH<sub>4</sub> producido. Cuando el estiércol se maneja como sólido (por ejemplo, en parvas o pilas) o cuando se deposita en pasturas y prados, tiene a descomponerse bajo condiciones aeróbicas y se produce menos CH<sub>4</sub>.

A raíz de esto, La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio Climático estableció un conjunto de objetivos para la reducción de Gases de Efecto Invernadero (GEI). A partir del Protocolo de Kyoto se establecieron metas de reducción para seis gases: dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), los gases hidrofluorocarbonos (HFCs), perfluorocarbonos (PFCs), y el hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>).

En términos absolutos, el sector energía aporta en forma dominante y creciente a los valores de las emisiones nacionales. La agricultura es el segundo sector que contribuye a las emisiones nacionales, por lo que se hace necesario buscar una forma de bajar este índice (CONAMA, 2010)

## **2.5. Marco referencial para la experimentación**

Existe bastante investigación relacionada con la digestión anaerobia, sin embargo, la co-digestión es algo relativamente nuevo dentro de los estudios de digestión. A escala de laboratorio existe un estudio donde se construye y prueba un aparato de vidrio para cuantificar la generación de biogás a escala de laboratorio (Clemente Fernández, 2010). Ocupa el principio de desplazamiento de agua que es el más utilizado para cuantificar gas a escala de laboratorio. Este aparato puede trabajar acoplado a un digester de 1-5 litros y puede desplazar 1 litro de agua en aproximadamente 3 horas en momentos de máxima producción de biogás a temperaturas cercanas a 30°C. El error propio de la medición con este sistema está cerca del 3%, aceptable para este tipo de equipo. Existen variaciones de este método pero todos cumplen el mismo principio, se puede construir en cualquier laboratorio, es de fácil operación, resiste la manipulación y suministra datos con un índice de error razonable para las necesidades de medición en lo relacionado con la producción de biogás.

Otro estudio interesante muestra un ensayo a escala de laboratorio utilizando diferentes biomasa agropecuarias. Éste se desarrolló en los laboratorios de la Facultad de Ciencias Agropecuarias del Instituto de Tecnología Agropecuaria de la Universidad de Rostock. El volumen mínimo de biogás obtenido fue de 50 ml y el máximo 130 ml en los ensayos donde se degrada 750 ml de cada tipo biomasa. Éstas fueron residuos de pavo puro, y mezclado con centeno y maíz en distintas proporciones. También existen estudios de co-generación de residuos de vacuno (Cornejo Ramírez, 2012), donde se obtuvo biogás a partir de estiércol de ganado vacuno y residuos agroindustriales (torta de piñón, cascarilla de arroz y rumen de ganado bovino). El biogás producido se colectó por desplazamiento de agua durante 35 días. El objetivo principal fue determinar el rendimiento óptimo de la mezcla de estiércol y residuos en la producción. La mayor producción de biogás más alta fue con la mezcla estiércol-torta de piñón y en la

relación de dilución, mezcla-agua, pero presentando un contenido de metano del 5,5%, no siendo factible para la combustión y/o producción de energía. Tuvo una producción de 1.248 ml biogás/kg de mezcla, mientras que el rumen de ganado bovino tuvo una producción 1.128 ml de biogás/kg de muestra, presentando un contenido de metano del 47,2%.

Por otro lado, además del estudio de óptimos en base a tipos de biomasa y co-generación, existen una variedad de documentos en donde se determinan parámetros técnicos para una producción óptima y eficiente de metano en el biogás. La facultad de Ciencias de Ingenierías de la Universidad Nacional de Huacavelica en Perú realizó un estudio con biodigestores a escala de laboratorio, se ocupó estiércol vacuno logrando un biogás de 56% de metano con temperaturas que oscilaban entre los 31-37°C y un rango de pH interno promedio del biodigestor entre los 6,5 y 7,3. El porcentaje de mezcla más eficiente fue el correspondiente a 25% en volumen de estiércol vacuno y 75% de agua e incorporación de agitación mecánica.

## CAPITULO III: MÉTODOS Y MATERIALES

### 3.1. Etapa preliminar:

Esta etapa consistió en la recolección de muestras y análisis de éstas. Se recolectaron las muestras de estiércol y residuos orgánicos de cocina, y se realizaron los análisis físico-químicos para la determinación de las características propias de la mezcla orgánica.

#### 3.1.1. Recolección y transporte de estiércol bovino y los residuos de cocina

Primero se procedió a recolectar las muestras de estiércol bovino en dos diferentes frascos herméticos de 960 ml, en estado semisólido. Por otro lado se recolectaron los residuos de cocina, los cuales fueron cortados, procesados y guardados en frascos herméticos de 960 ml. Cabe destacar que por estación los residuos correspondieron principalmente a restos de frutas (duraznos, damascos, manzanas y melón) y verduras (restos de lechuga, repollo, apio, cascaras de tomate, y restos de otros vegetales de estación).

Se debe considerar la relación carbono/nitrógeno (C/N) de la mezcla para así tener una buena relación de nutrientes para la digestión, por lo que se tomó en cuenta el porcentaje de carbono y de nitrógeno encontrado en bibliografía, relacionándolos como muestra la siguiente ecuación:

$$\frac{C}{N} = \frac{C_1X_1 \times C_2X_2 \times C_3X_3 \times \dots}{N_1X_1 \times N_2X_2 \times N_3X_3 \times \dots} = \frac{\sum C_iX_i}{\sum N_iX_i}$$

Ecuación 1: (Acosta, 2011)

Donde:

C: Porcentaje de carbono de la materia prima

N: Porcentaje de nitrógeno de la materia prima

X: Peso de la materia prima

Tabla 9: Relación C/N de distintas materias primas

Residuo Orgánico	Porcentaje de Nitrógeno	Relación C/N
Residuos de frutas	1,52	34,8
Residuos de vegetales	7,0-10,0	20,0
Excremento de Vaca	1,7	18,0
Excremento de Caballo	2,3	25,0
Purín	3,75	20,0
Excremento de Aves	6,3	15,0
Excremento de Oveja	3,75	22,0
Hierba	1,96-2,15	21,0-20,1
Hojas muertas	0,5-1,0	40,0-60,0
Aguas residuales	1,88-5,6	6,3-15,7

Fuente: (Tchobanoglous, Theisen, & Vigil, 1993)

Una vez procesada la mezcla de residuos orgánicos se mezcló con la muestra de estiércol según la proporción que favorece la relación C/N.

Por último, se determinaron las características físico-químicas a la entrada. Los análisis que se realizaron fueron Sólidos totales (ST), Sólidos volátiles (SV) y DQO (Demanda Química de Oxígeno), por lo cual los frascos fueron etiquetados e inmediatamente almacenados hasta la llegada al Laboratorio de Medio Ambiente de la Universidad de Playa Ancha.

### 3.1.2. Análisis elemental de la muestra

Los parámetros a considerar para la caracterización de la mezcla a emplear para la producción de biogás corresponderán a (Field , Sierra-Alvarez, & Lettinga, 1988):

Tabla 10: Análisis de laboratorio

Muestra a ser Analizada	Método	Referencia	
Análisis Físicos	Sólidos Totales (ST)	Método 2540. B del A.S.T.M.	Standard Method for the Examination of Water and Wastewater
	Sólidos Volátiles Totales (SV)	Método 2540. E del A.S.T.M.	Standard Method for the Examination of Water and Wastewater
	Demanda Química de Oxígeno (DQO)	Método espectrofotométrico	Standard Method for the Examination of Water and Wastewater

Fuente: (Elaboración Propia)

Esta caracterización es importante, ya que para la producción de gas no es conveniente que la carga a degradar este muy concentrada ni muy diluida, se recomienda una concentración de 5-10%. Sobre la base de los sólidos totales de la carga se puede calcular la concentración de la mezcla, y con ello si es o no necesario la adición de agua.

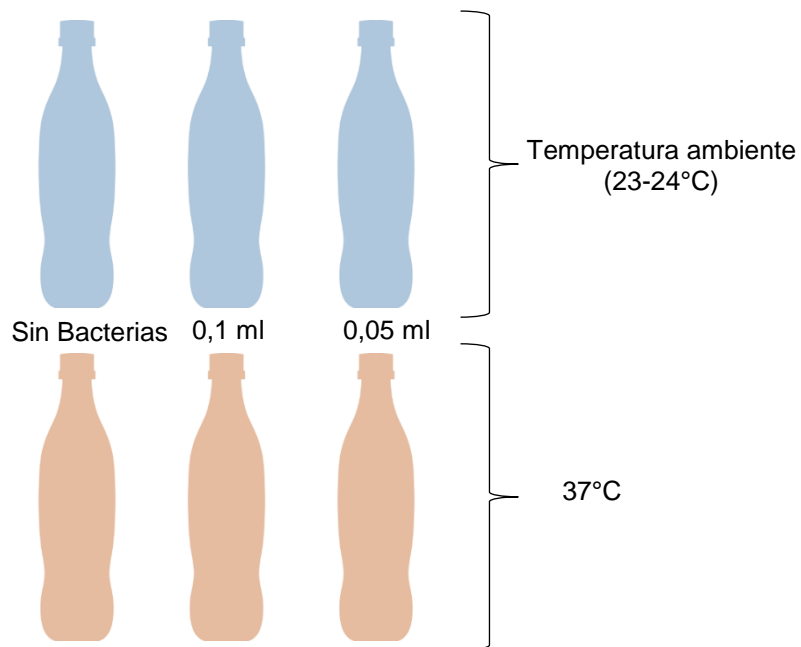
### 3.2. Etapa Experimental

#### 3.2.1. Diseño Experimental

Para evaluar la aplicación de sistemas de tratamiento anaerobios en la degradación de un sustrato orgánico sólido es preciso determinar previamente su potencial metanogénico (Angelidaki, Alves, Bolzonella, & Campos, 2009). La manera de evaluar este potencial a escala de laboratorio es a través de ensayos en discontinuos, específicamente mediante el Ensayo de Potencial Metanogénico o BMP (de su sigla en inglés Biochemical Methane Potencial). Este ensayo tiene una duración aproximada de 20-30 días, tiempo donde es evaluada la producción de metano (CH<sub>4</sub>), que está estrechamente relacionada con la reducción de la materia orgánica expresada como DQO (Demanda Química de Oxígeno).

El diseño experimental consistió en seis reactores a escala de laboratorio, a los cuales se les agregó bacterias y se mantuvieron a determinada temperatura según el modelo observado en la Figura 2. Para cada reactor se utilizó una botella de vidrio alargada de 250mL de capacidad y se le añadió a cada uno la misma cantidad de mezcla de residuo orgánico, además de una dosis de bacterias en distintas proporciones. A un par se le adicionó 0,1 mL de bacterias, al siguiente par 0,05 mL, y se dejó un par como blanco, al cual sólo se le adicionó la mezcla de residuos orgánicos. El producto bacteriano seleccionado para el tratamiento corresponde al Producto OikosVersal de la Empresa Oikos.

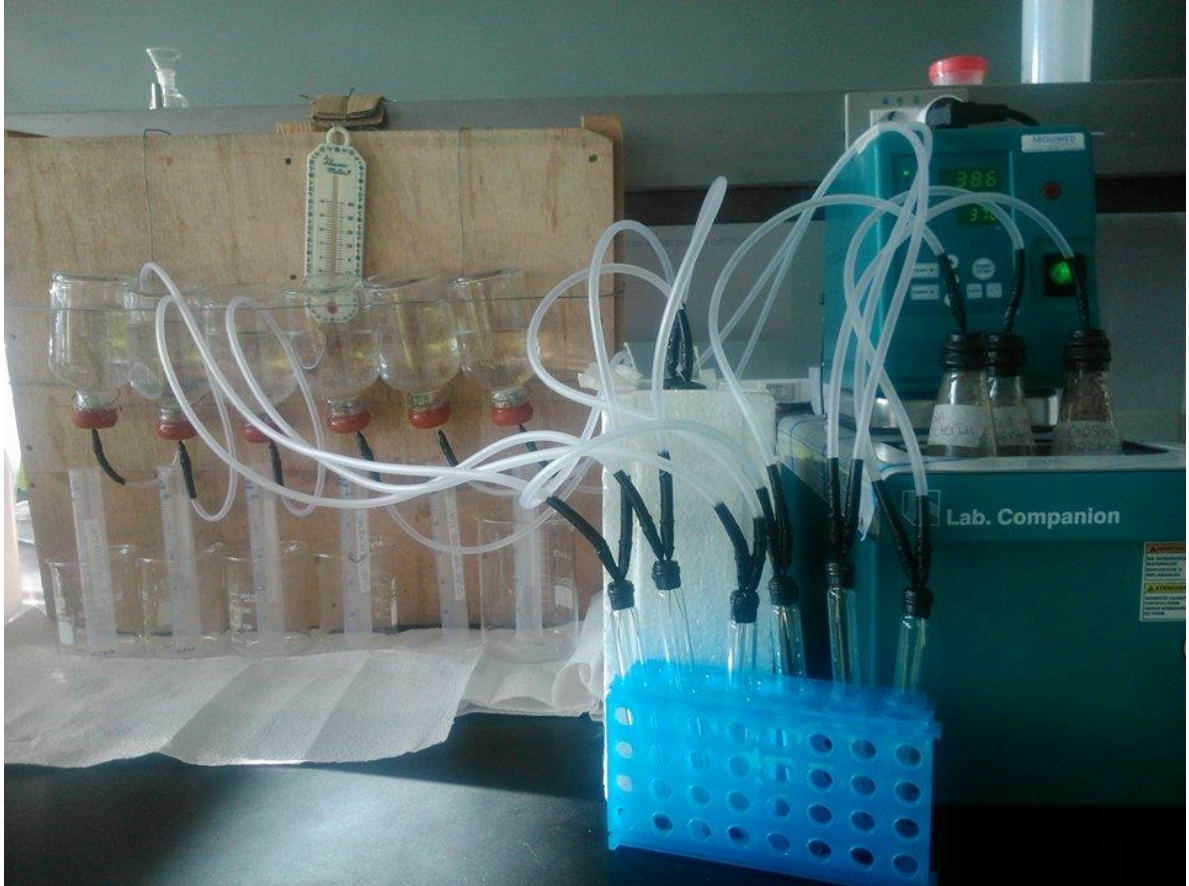
Figura 2: Diseño Experimental



Fuente: (Elaboración Propia)

Cada botella se cerró herméticamente, luego se colocaron las tres botellas correspondientes en la incubadora a 37°C, y el resto a temperatura ambiente con aislación para no perder calor.

Imagen 1: Ubicación de las unidades experimentales



Fuente: (Elaboración Propia)

### 3.2.1.1. Sistema microrbiológico Oikos Versal AG

Es un producto microbiológico fabricado en Estados Unidos usando una biotecnología orgánica y sustentable. Contiene una mezcla balanceada de bacterias acidolácticas, bacterias fototrópicas, hongos, levaduras y actinomicetos en un medio líquido. Las bacterias que contiene son *Lactobacillus plantarum*, *Lactobacillus casei*, *Lactobacillus fermentum*, *Lactobacillus del brueckil*, *Bacillus subtilis*, *Sacharomy cescerevisiae*, *Rhodopseudomonas laustre*. 1 millón de unidades formadoras de colonia por milímetro cuadrado.

Las bacterias Lactobacillus son anaerobios facultativos o microaerófilos, pero su crecimiento óptimo se alcanza bajo condiciones anaeróbicas. Poseen un amplio rango de temperatura de crecimiento (2°C a 53°C) pero la mayor parte son mesófilos (30-40°C) con un límite superior de 40°C.

Es un producto bastante versátil, al que se le puede dar bastantes usos. Las indicaciones ambientales de Oikos Versal incluyen, pero no se limitan, a los siguientes: Control de olores en granjas, cochineras, etc; tratamientos de lagunas de oxidación y similares; tratamientos de aguas negras; tratamientos de desechos sólidos; tratamientos de sistemas sépticos; biorremediación en zonas de desastre, incluyendo prevención de enfermedades y control de olores.

Entre los beneficios al usarlo con aguas residuales, encontramos:

- Reducción masiva de olores
- Reducción drástica de los gases tóxicos, incluyendo H<sub>2</sub>S, mercaptanos, etc
- Reducción drástica de lodos
- Reducción drástica de bacterias, levaduras y protozoos patógenos
- Reducción de la demanda biológica de oxígeno (DBO) y demanda química de oxígeno (DQO) en aguas y sólidos recuperados, y así la reducción en las necesidades de aireación
- Reducción de la cantidad de moscas y mosquitos alrededor de desechos y camas
- Reducción de sólidos suspendidos (SS) y sólidos disueltos (SD) en aguas recuperadas
- Reducción en el crecimiento de fitoplancton en aguas y lagunas
- Reducción de ácido nítrico, ácido nitroso y ácido sulfúrico en aguas residuales, previniendo así la corrosión en las partes metálicas de bombas, válvulas y tuberías

- Mayor eficacia y velocidad en la digestión de desechos
- Reducción en los niveles detectables de metales pesados y tóxicos en los desechos, incluyendo cadmio (Cd), cromo (Cr), mercurio (Hg), arsénico (As), cobre (Cu) plomo (Pb) y níquel (Ni)
- Normalización de pH
- Mejoras en valores nutritivos, seguridad y microfibra de desechos sólidos que serán aplicados en el suelo

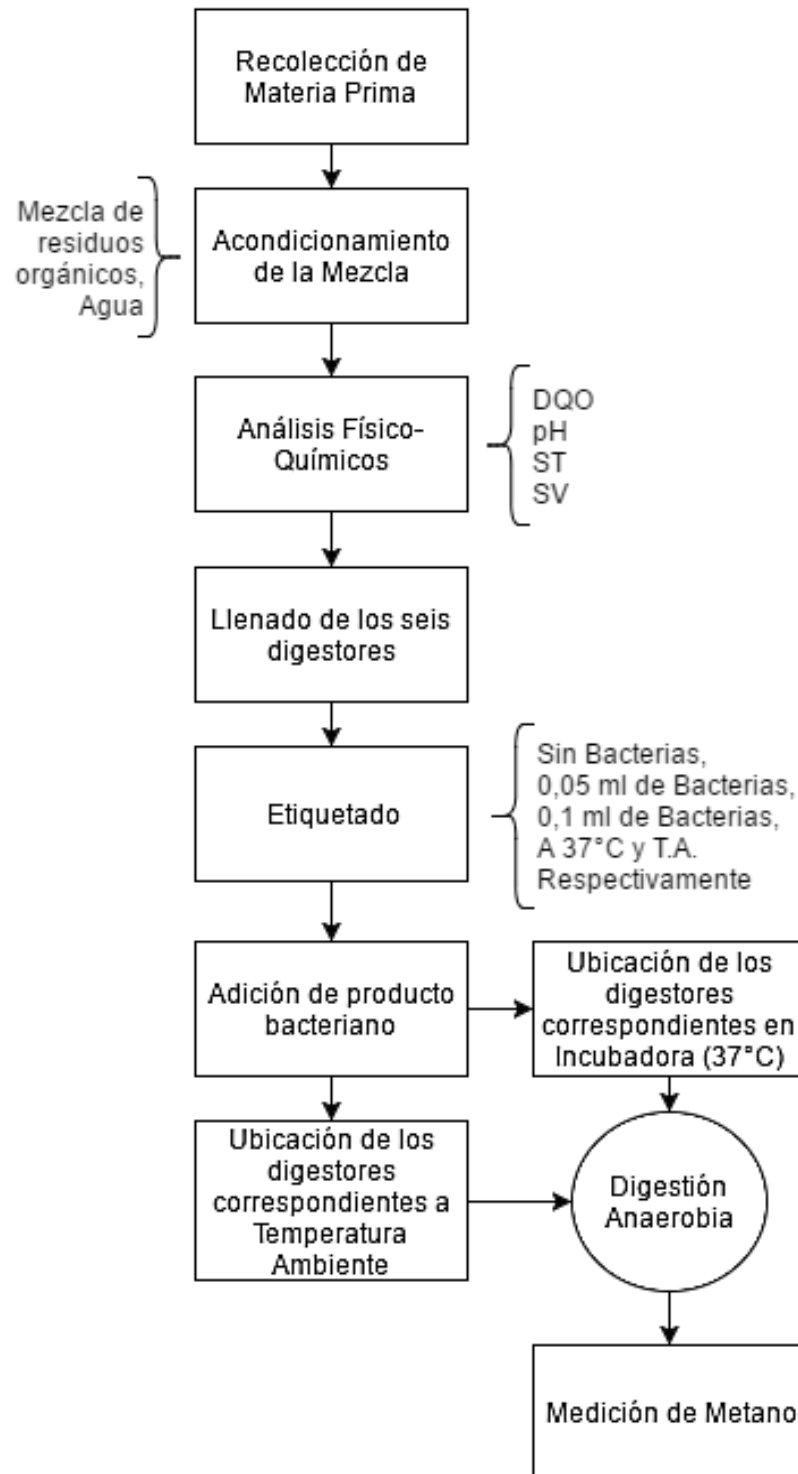
Como se puede ver es un producto que mejora notablemente la digestión anaeróbica, no sólo en temas de producción sino también en la calidad del digestato y disminuye problemas de olores y formación de gases tóxicos, entre otros.

### **3.2.2. Procedimiento**

En la Figura 3 se detalla con un diagrama el diseño experimental. Primero se añadió la mezcla de residuo a cada digestor, la adición de los volúmenes y de las distintas soluciones durante el ensayo se realizaron mediante su registro en peso, con la finalidad de reducir el error asociado al uso de micropipetas en mal estado.

Antes de la puesta en marcha se realizó un control para corroborar el pH de cada ensayo, ya que según investigaciones previas, los ensayos con pH cercanos a la neutralidad logran mejores resultados en la producción de metano. Por tanto, se midió y registró el valor del pH, en esta etapa se ajustó con soluciones de hidróxido de sodio (NaOH) y ácido clorhídrico (HCl) (2N) según correspondió. Una vez ajustado el pH la mezcla estuvo lista para distribuir en cada botella. Se procedió a marcar cada una de ellas con etiquetas (sin bacterias, 0,1 ml de bacterias y 0,05 ml bacterias) para evitar confusiones y se le añadió la cantidad de bacterias propuesta en cada caso. Por último se taparon y sellaron las botellas.

Figura 3: Diagrama Experimento



Fuente: (Elaboración Propia)

Se debe medir y registrar la producción diaria de metano ( $\text{CH}_4$ ) durante 3 semanas aproximadamente o hasta que el 80% del sustrato haya sido consumido. Por lo que se midió la producción diaria de metano durante 4 semanas.

### **3.2.3. Medición de Metano ( $\text{CH}_4$ )**

El volumen del  $\text{CH}_4$  producido durante el ensayo puede ser medido de varias formas de las cuales por desplazamiento de un líquido, y por sobrepresión del biogás generado (manómetro), son las más habituales. En esta investigación se utilizó el método de desplazamiento de líquido.

#### **3.2.3.1. Medición por desplazamiento**

En general, esta forma es la más utilizada para ensayos de digestión anaerobia. El sistema más común emplea un frasco Mariotte, que en este caso es reemplazado por una botella invertida como se observa en la Imagen 3.

Este sistema contiene una disolución fuertemente alcalina de hidróxido de sodio ( $\text{NaOH}$ ) a una concentración de 25 g/L. El biogás producido durante el ensayo es recogido por el sistema de medición de la siguiente forma: el  $\text{CO}_2$  contenido en el gas es absorbido por el medio alcalino por formación de carbonato, el  $\text{CH}_4$  presente mayormente en el biogás (gases tales como: nitrógeno e hidrógeno se desprecian de la medición al estar en cantidades pequeñas) es capaz de alcanzar espacio de cabecera del recipiente de medición, provocando desplazamiento de un volumen equivalente de líquido desplazado hacia la probeta donde se realiza la medición.

Imagen 2: Ensayos a la semana de operación



Fuente: (Elaboración Propia)

Las mangueras pasan por una trampa de NaOH antes de pasar al digestor, con el fin de evitar que se contamine el digestor en caso de que la solución baje por la manguera. La trampa consiste simplemente en tubos de ensayo vacíos con una entrada y salida, por donde pasa el gas antes de pasar a la botella. En la imagen 3 se puede observar en detalle.

Imagen 3: Trampa de NaOH



Fuente: (Elaboración Propia)

#### **3.2.4. Monitoreo de los ensayos**

Para evaluar el comportamiento del ensayo, se realizaron distintos análisis físico-químicos, tanto al inicio de la digestión anaerobia como al final de ésta. Se midieron los siguientes parámetros DQO, ST y SV, para observar y analizar la capacidad degradadora de cada digestor.

Es importante realizar el análisis de estos parámetros para cumplir con la normativa vigente. La DQO y los SV son dos parámetros que están relacionados con la materia orgánica presente en el residuo.

#### **3.3. Métodos analíticos**

Para determinar las características del efluente, se evaluaron los parámetros mencionados anteriormente. A continuación se exponen los métodos que se emplearon.

### **3.3.1. Demanda Química de Oxígeno**

La Demanda Química de Oxígeno (DQO) corresponde al oxígeno equivalente de la materia orgánica de una muestra que es susceptible a la oxidación por un agente químico. Es utilizada para medir la cantidad de materia orgánica y compuestos oxidables en una muestra de agua.

El método empleado se basa en la reacción de la muestra con un oxidante energético, por sus propiedades químicas el dicromato es el oxidante utilizado. Los compuestos orgánicos oxidables actúan reduciendo el dicromato, Cr(VI) a ion crómico Cr (III). Así, la cantidad de dicromato consumido proporciona una medida de la concentración de materia orgánica en la muestra. La utilización de la colorimetría (absorción visible-ultravioleta) para la determinación de la DQO en esta práctica se basa en los diferentes espectros de absorción del Cr(VI) y Cr(III), pudiendo detectar ambas especies.

### **3.3.2. Sólidos Totales**

Los sólidos totales (ST) se definen como los sólidos que corresponden a la materia presente en la muestra y representan el peso de sólidos solubles más sólidos suspendidos. El residuo suspendido total corresponde al residuo que queda luego de que una muestra o RIL (Residuo Industrial Líquido) es evaporada y secada.

El método consiste en secar una muestra por evaporación en una cápsula de porcelana a 103-105°C. El incremento del peso de la cápsula representa los sólidos totales.

### **3.3.3. Sólidos Volátiles**

El residuo volátil corresponde al residuo que se ha volatilizado luego de que la cápsula que contiene los sólidos totales ha sido expuesta a 550°C.

### 3.4. Análisis de Factibilidad

#### 3.4.1. Análisis Económico

En esta sección se analizó la factibilidad económica del proyecto. En primer lugar se hizo un análisis de la situación actual en cuanto a uso de leña utilizada para calefaccionar. Se analizó la demanda energética del sector y el gasto que significa.

Posteriormente se hizo un análisis de la situación futura, cantidad de energía que se genera en base a los residuos que se producen diariamente en el Fundo y los costos que implica. Así, por cada arreglo se determinó la energía necesaria para sustituir la leña como combustible para calefacción, considerando el ahorro que implica al año, el costo anual para lograr esta producción (costo por el uso de bacterias), cuánto digestato es necesario vender como abono orgánico para que el proyecto sea rentable. Para detallar esto se realizó un flujo de caja y se calcularon dos indicadores económicos para verificar la viabilidad del Proyecto, el VAN (Valor Actual Neto), el TIR (Tasa Interna de Retorno) y el TRI (Tasa de Retorno de Inversión).

La fórmula para el cálculo del VAN es la siguiente:

$$VAN = -I + \sum_{n=1}^N \frac{Q_n}{(1+r)^n}$$

Ecuación 2: (Ramírez, 2007)

Donde:

$I$  = Inversión

$Q_n$  = Flujo de caja del año  $n$

$N$  = Número de años de inversión

La TIR, es el tipo de interés en el que el VAN se hace cero. Si el TIR es alto, estamos ante un proyecto empresarial rentable, que supone un retoro de la inversión equiparable a unos tipos de interés altos que posiblemente no se encuentren en el mercado.

El TRI, tiene como objetivo determinar el número de años en que se recupera la inversión, mediante la resta de los flujos netos anuales descontados del monto de la inversión, hasta el punto que se iguala o sobrepasa dicha inversión.

#### **3.4.1.1. Diseño del biodigestor**

Es necesario conocer el gasto inicial que implica la construcción del biodigestor. Por lo que se propuso un diseño de biodigestor, viendo los costos implicados. El sistema propuesto es un biodigestor de mezcla completa a temperatura mesófila. Se eligió este tipo de biodigestor por la necesidad de mantener la mezcla con temperatura. Para el diseño se tomó en cuenta lo siguiente:

##### **a) Cantidad de estiércol:**

La cantidad de estiércol disponible depende del manejo del ganado en la zona. El Fundo cuenta con 48 vacas lecheras, por tanto los datos para obtener la cantidad de estiércol se sacaron de la información en terreno.

##### **b) Materia a digerir:**

Es necesario conocer la mezcla que se va a ingresar al biodigestor, para así poder calcular los volúmenes reales para el diseño. Estos datos fueron obtenidos en la parte experimental, se determinaron las proporciones, tanto de agua como de residuo, para la mezcla.

**c) Tiempo de retención hidráulico (TRH):**

Se refiere al tiempo que transcurre entre la carga y descarga del sistema. La velocidad de degradación depende en gran parte de la temperatura del ambiente, pues a mayor temperatura el tiempo de retención requerido es menor. En bibliografía podemos encontrar tiempos de retención recomendados, como los que aparecen en la Tabla 11. Sin embargo, se rigió por el comportamiento obtenido en la parte experimental del proyecto.

Tabla 11: Tiempos de retención

Temperatura (°C)	Días
10	55
20	25
30	10

Fuente: (CADECAP, 2007)

**d) Volumen del tanque de alimentación y del digestor:**

Se debe considerar la relación existente entre el flujo volumétrico del influente y TRH. Se aplica la siguiente función de cálculo para el tanque de alimentación:

$$Vt = \frac{V_{mezcla}}{6 [días]} \cdot 3$$

Ecuación 3: (Elaboración propia)

Donde:

$Vt$  = Volumen del tanque de alimentación (m<sup>3</sup>)

$V_{mezcla}$  = Volumen diario de residuos (m<sup>3</sup>/día)

Cabe destacar que se alimenta el biodigestor cada 6 horas, por lo que el volumen de éste debe soportar un sexto de la carga diaria. Por otro lado, se utiliza como

medida de seguridad un factor de 3, que es lo estandarizado para los tanques de alimentación y así poder sobrellevar en caso de cualquier inconveniente.

Para el volumen del biodigestor se debe aplicar la siguiente formula:

$$Vd = (V_{mezcla} \cdot TRH) + Volumen\ Gaseoso$$

Ecuación 4: (Elaboración Propia)

Donde:

$Vd$  = Volumen del biodigestor ( $m^3$ )

$TRH$  = Tiempo de Retención Hidráulico (días)

Es necesario que el volumen del digestor pueda soportar tanto el volumen diario del residuo, como el del gas generado, durante el tiempo de retención dado.

#### **e) Dimensionamiento del tanque de alimentación y biodigestor:**

Se define una profundidad de 1,5 metros para el dimensionamiento del taque de alimentación, utilizando además la relación 2:1 para el largo y ancho.

$$A_t = \frac{V_t}{L_t \cdot 1,5 [m]}$$

Ecuación 5: (Elaboración Propia)

Donde:

$A_t$  = Ancho del tanque de alimentación (m)

$V_t$  = Volumen del tanque de alimentación ( $m^3$ )

$L_t$  = Largo del tanque de alimentación (m)

El largo se calcula con la siguiente función de cálculo:

$$L_t = \sqrt{\left[\left(\frac{V_t}{1,5 [m]} \cdot 2\right)\right]}$$

Ecuación 6: (Elaboración Propia)

Donde:

$L_t$  = Largo del tanque de alimentación (m)

$V_t$  = Volumen del tanque de alimentación (m<sup>3</sup>)

Para el dimensionamiento del biodigestor se tomará como profundidad 2,5 metros. También se usará una proporción de 2:1 para el largo y ancho.

#### f) Requerimiento de fierro para el hormigón:

Para los verticales la estructura de hormigón armado se utiliza fierros de 6 mm de diámetro y con un espesor de 0,15 metros. Se aplica la siguiente función de cálculo:

$$Fe6 = \left(\frac{A_d \cdot 2 + L_d}{0,15 [m]} + 1\right) \cdot 2$$

Ecuación 7: (Urra Balcazar, 2009)

Donde:

$Fe6$  = Fierros de 6 mm de diámetro (m)

$A_d$  = Ancho del biodigestor (m)

$L_d$  = Largo del biodigestor (m)

Cada fierro tiene 11 metros de largo, y se vende por kilogramo que pesa 0.222 kilogramos por metro. Se aplica la siguiente función de cálculo:

$$fe6k = Fe6 \cdot 0,222 [kg/m]$$

Ecuación 8: (Urra Balcazar, 2009)

Donde:

$f_{e6k}$  = Fierros de 6 mm de diámetro (kg)

$Fe6$  = Fierros de 6 mm de diámetro (m)

Para los horizontales del hormigón armado se utilizan fierros de 8 mm de diámetro. Se aplica la siguiente función de cálculo:

$$Fe8 = \left( \frac{L_d}{0,15 \text{ m}} + 1 \right)$$

Ecuación 9: (Urra Balcazar, 2009)

Donde:

$Fe8$  = Fierros de 8 mm de diámetro (m)

$L_d$  = Largo del biodigestor (m)

Cada fierro tiene 13 metros de largo, y se vende por kilogramo que pesa 0.4 kg/M. Se aplica la siguiente función de cálculo:

$$f_{e8k} = Fe8 \cdot 0,4 \text{ [kg/m]}$$

Ecuación 10: (Urra Balcazar, 2009)

Donde:

$f_{e8k}$  = Fierros de 8 mm de diámetro (kg)

$Fe8$  = Fierros de 8 mm de diámetro (m)

El tanque de alimentación no lleva fierros, basta con los 15 cm de espesor del hormigón.

Es necesario el uso de bombas hidráulicas y una caldera para mantener el digestor con temperatura. Estos datos se sacaran de bibliografía de acuerdo a los requerimientos del digestor.

**g) Calculo de tuberías de calefacción:**

Se debe cubrir un 75% del volumen a calentar, la instalación debe comenzar a 0,25 metros del fondo para el tanque de alimentación y 0,5 metros para el digestor.

El tanque de alimentación almacena la cuarta parte de la carga diaria para descargar posteriormente del calentamiento de los purines en el digestor.

Para los digestores se considera la carga diaria por el tiempo de retención hidráulico y se aplica la siguiente función de cálculo:

$$Prof\ Masa = \frac{C_{td}}{L_d \cdot A_d \cdot f}$$

Ecuación 11: (Urra Balcazar, 2009)

Donde:

*Prof Masa* = Profundidad de masa a calentar (m)

*C<sub>td</sub>* = Cantidad de masa a calentar (m<sup>3</sup>)

*f* = Factor (sólo para el tanque de alimentación ya que se descarga 4 veces al día)

*L<sub>d</sub>* = Largo de la unidad (m)

*A<sub>d</sub>* = Ancho de la unidad (m)

Para saber el número de hileras de tuberías para la calefacción en el tanque de alimentación y digestores se aplica la siguiente función de cálculo:

$$hileras = \frac{prof. masa - dist. fondo}{0,25 [m]}$$

Ecuación 12: (Urra Balcazar, 2009)

Donde:

*hileras* = Número de hileras (unidad)

*prof masa* = Profundidad de la masa a calentar (m)

*dist. fondo* = Distancia de profundidad (m)

0,25 = distancia entre hileras (m)

Para saber la cantidad en metros de tuberías se aplica la siguiente función de cálculo:

$$Tuberías = [(L_d \cdot hileras) \cdot 2 + (A_d \cdot hileras \cdot 2)] \cdot 1,25$$

Ecuación 13: (Urra Balcazar, 2009)

Donde:

*Tuberías* = Cantidad de tuberías (m)

1,25 = Factor de seguridad para la instalación desde la caldera al tanque y digestores (m)

La bomba hidráulica y la caldera se elegirán según el criterio del proveedor para la cantidad de materia prima que se desea agitar y calentar.

#### **3.4.1.2. Costo del biodigestor**

Se considera la cotización para la construcción, instalación, montaje y equipos que son necesarios adquirir. El proyecto tiene una vida útil de 20 años, con una amortización de los valores a un 10% anual.

La determinación de los costos son desembolsos tanto para materiales como humanos para el desarrollo de la actividad del proyecto.

Los ingresos provienen de la valorización económica del fertilizante y del ahorro que implica el uso de biogás como combustible para calefacción en reemplazo de la leña que se utiliza en un hogar promedio.

Una vez calculados los ingresos y los costos del proyecto, se procedió a hacer un flujo de caja para cada arreglo. Considerando los costos de calefacción y de bacterias para cada uno de ellos.

### **3.4.2. Análisis Ambiental**

#### **3.4.2.1. Reducción de Gases de Efecto Invernadero (GEI)**

Se calcularon las posibles reducciones de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) asociados al reemplazo de la leña como combustible y las emisiones que significa tener a los purines sin tratamiento.

##### **a) Emisiones de GEI por la combustión de Leña como combustible**

En general, las emisiones de GEI por la combustión de combustibles se calculan multiplicando el consumo de combustible por el factor de emisión correspondiente para cada combustible.

La cuantificación de emisiones se lleva a cabo para los principales GEI emitidos durante la combustión. En este proceso, el carbono se emite inmediatamente como Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ). Adicionalmente, se emite carbono en formas como Monóxido de Carbono (CO), metano ( $\text{CH}_4$ ), Óxido de Nitrógeno ( $\text{N}_2\text{O}$ ), y otros compuestos orgánicos volátiles (COV). Con el fin de homologar el efecto de

los GEI, las emisiones de gases no-CO<sub>2</sub> pueden expresarse en términos de CO<sub>2</sub> equivalente (CO<sub>2</sub>e)<sup>9</sup>.

En general, las emisiones de CO<sub>2</sub> por combustión dependen del contenido de carbono del combustible considerando, y son dependientes de la tecnología de combustión empleada y del estado de mantenimiento de estas tecnologías, entre los factores típicamente poco documentados.

Debido a lo anterior, se emplean factores de emisión de GEI estándar cuando no existe información detallada de las tecnologías específicas utilizadas en el proceso de combustión y su estado de mantenimiento. La Ecuación 13 corresponde a las emisiones de GEI por combustión:

$$E_{g,f}^c = C_f \cdot FE_{g,f}$$

Ecuación 14: (IPCC, 2006)

Donde:

$E_{g,f}^c$  = Emisiones de gas de efecto invernadero “g” por la combustión del energético “f” (kg de GEI)

$C_f$  = Consumo del energético “f” (TJ)

$FE_{g,f}$  = Factor de emisión estándar de gas “g” en la combustión del energético “f” (kg/TJ)

El cálculo de emisiones de GEI totales por combustión de energéticos es, como se muestra en la Ecuación 14, la suma de emisiones generadas por la combustión de todos los energéticos:

---

<sup>9</sup>CO<sub>2</sub>e es una medida que representa, para una mezcla dada de GEI, la cantidad de CO<sub>2</sub> que tendría el mismo potencial de calentamiento global a lo largo de un periodo de tiempo determinado (típicamente 100 años).

$$E_g^c = \sum_{f=1}^F E_{g,f}^c$$

Ecuación 15: (IPCC, 2006)

Donde:

$E_g^c$  = Emisiones totales del gas “g” (kg de GEI)

$E_{g,f}^c$  = Emisiones del gas “g” por la combustión del energético “f” (kg de GEI)

El listado completo de factores estándar de emisión de GEI para diferentes energéticos se muestran en el Anexo 2.

### **b) Emisiones de Metano (CH<sub>4</sub>) producidas por la Gestión del Estiércol**

En esta sección se describe cómo estimar el CH<sub>4</sub> producido por la Gestión del Estiércol. La Ecuación 4 muestra cómo calcular las emisiones de CH<sub>4</sub> producidas por la gestión del estiércol.

$$CH_{4_{Estiercol}} = \sum_{(T)} \left( \frac{EF_{(T)} \cdot N_{(T)}}{10^6} \right)$$

Ecuación 16: (IPCC, 2006)

Donde:

$CH_{4_{Estiercol}}$  = Emisiones de CH<sub>4</sub> por la gestión del estiércol, para una población definida (CH<sub>4</sub>/año)

$EF_{(T)}$  = Factor de emisión para la población de ganado definida (kg CH<sub>4</sub>/cabeza/año)

$N_{(T)}$  = Cantidad de cabezas de la especie/categoría de ganado “T”

T = Especie/categoría de ganado

En el Anexo 3 se muestran los datos que subyacen a los factores de emisión de CH<sub>4</sub> de gestión de estiércol.

### **c) Cuantificación de emisiones evitadas por acciones de abatimiento**

En esta sección se calculó la cantidad neta de emisiones luego del tratamiento y del reemplazo de la leña como combustible. Para esto se requiere la proyección de dos escenarios:

- Escenario A - Línea de base: no presupone la implementación de las medidas de aprovechamiento de los residuos para la generación de energía.
- Escenario B – Escenario de abatimiento: presupone la implementación de medidas para el aprovechamiento sustentable de la energía.

El escenario A muestra las emisiones que actualmente se producen en la Finca. Tanto por el uso de leña como combustible, como además las emisiones que se generan al dejar los purines en un pozo sin tratamiento.

El escenario B define la evolución futura de consumo de energía incorporando los efectos de la implementación de las acciones de aprovechamiento consideradas. Este escenario incorpora la penetración inmediata en la cuantificación de emisiones de GEI.

Las emisiones de GEI en cada uno de estos escenarios se calculan siguiendo las metodologías descritas en los apartados anteriores. Las emisiones evitadas por las acciones realizadas para el aprovechamiento sustentable de la energía se calculan como la diferencia de emisiones bajo ambos escenarios de acuerdo con:

$$\Delta E = E_A - E_S$$

Ecuación 17: (Elaboración Propia)

Donde:

$\Delta E$  = Emisiones de CO<sub>2e</sub> evitadas por las acciones de aprovechamiento realizadas (kg de CO<sub>2e</sub>)

$E_A$  = Emisiones de CO<sub>2e</sub> del sector energético en la línea base (kg de CO<sub>2e</sub>)

$E_S$  = Emisiones de CO<sub>2e</sub> del sector energético bajo el escenario de abatimiento (kg de CO<sub>2e</sub>)

A continuación, se muestra la tabla de conversión para los GEI seleccionados a CO<sub>2e</sub>.

Tabla 12: Potencial de calentamiento global de diferentes GEI

Gas		CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O
Horizonte de Tiempo	20 años	1	56	280
	100 años	1	21	310
	500 años	1	6,5	170

Fuente: (UNFCCC, 2014)

## CAPITULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIONES

### 4.1. Etapa preliminar

Durante esta etapa se recolectó y se evaluó las características propias del estiércol generado, además se analizó la cantidad de excretas bovinas y residuos orgánicos de las que se disponía, para posterior a ello interpolar a la situación real.

#### 4.1.1. Recolección y transporte de estiércol bovino y los residuos de cocina

Antes de realizar la recolección del estiércol bovino fue necesario saber el tipo de ganado del que disponía la finca, determinándose que se contaba con ganado vacuno lechero de la raza Holstein Friesian. Por otro lado, se preguntó al personal encargado acerca del alimento del ganado, llegando a la conclusión de que ingieren la mayor parte del año pastos y restos de hortalizas.

#### 4.1.2. Caracterización del sustrato

- **Carga Inicial**

Utilizando la ecuación 1 con los datos de la Tabla 8, se procedió a calcular las proporciones de materia prima para obtener una buena relación C/N. Se ajustó a la relación óptima de entre 20-30, escogiéndose 25 (Lopez G., 1992)

Tabla 13: Proporción C/N de la mezcla

Sustratos	%C	%N	Relación C/N	Cantidad (g)
Estiércol bovino	30,6	1,7	18	100
Residuos de frutas	52,896	1,52	34,8	100
			Total	200

Fuente: (Elaboración Propia)

Reemplazando los datos en la Ecuación 1 obtenemos lo siguiente:

$$\frac{C}{N} = \frac{(30,6 \times 100) \times (52,896 \times 100)}{(1,7 \times 100) \times (1,52 \times 100)} = 25,93$$

Se debe añadir estiércol y residuo orgánico de cocina en la proporción 1:1. La Tabla muestra las proporciones utilizadas de cada co-sustrato y la composición final media de cada muestra.

Tabla 14: Proporciones utilizadas

Residuo	Cantidad (g)
Estiércol bovino	177,7
Restos de fruta	177,8
Total Mezcla	355,5

Fuente: (Elaboración Propia)

Se dividió la cantidad en 6 y dio como resultado 59,25 g, por tanto se procedió a añadir 55 g de mezcla a cada digestor, por pérdidas en traspaso matraz botella.

El análisis elemental de la mezcla a utilizar en la digestión sirvió para tener una noción sobre las características generales de la mezcla de sustratos a tratar durante la digestión anaerobia. Los resultados de los análisis físico-químicos se muestran a continuación y fueron realizados en el Laboratorio de Medio Ambiente de la facultad de Ingeniería, de la Universidad de Playa Ancha.

Tabla 15: Resultados del análisis de la Fundo

Parámetro	Unidad	Resultado Mezcla
pH	-	7,03
Sólidos Totales	%	29,41
Sólidos Volátiles	%	16,85
DQO	mgO <sub>2</sub> /L	13.872

Fuente: (Elaboración Propia)

Como se obtuvo un alto porcentaje de sólidos totales, la muestra se diluyó con agua destilada en las proporciones que se muestran en la Tabla 10.

Tabla 16: Proporción de agua utilizada

Tipo	Cantidad
Mezcla de residuos	55 g
Agua	30 ml

Fuente: (Elaboración Propia)

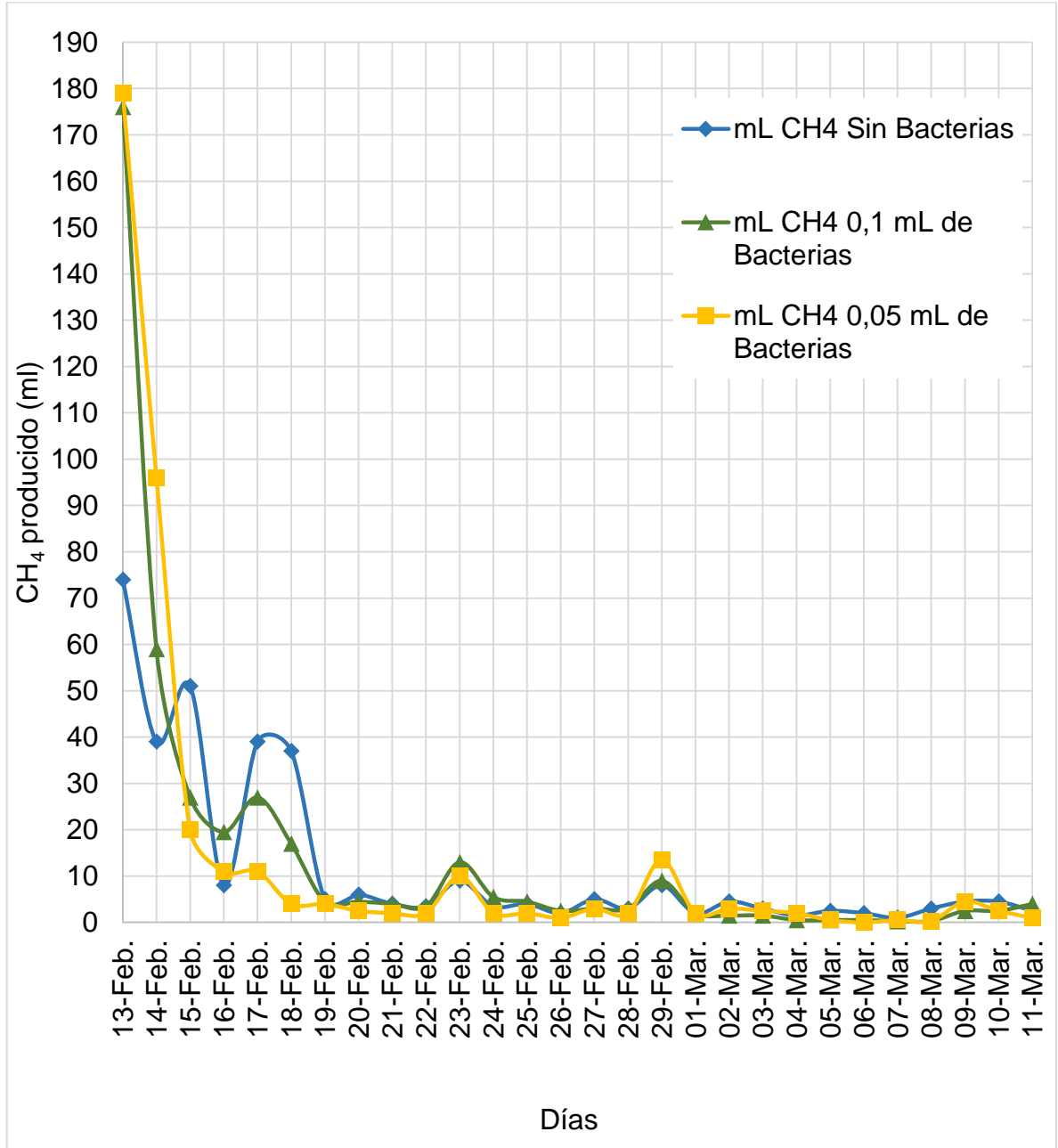
### 3.5. Operación

#### 3.5.1. Monitoreo del efluente gaseoso

La producción de metano fue evaluada con base en el volumen diario producido por cada biodigestor, medido por el método de desplazamiento de agua. Cada día se verificó la producción de metano (CH<sub>4</sub>), las mediciones se realizaron hasta que se pasó el máximo de producción. Considerándose un periodo de evaluación de 28 días. Al finalizar dicho periodo, se tomaron las muestras finales y se aplicaron los análisis mencionados para las muestras iniciales.

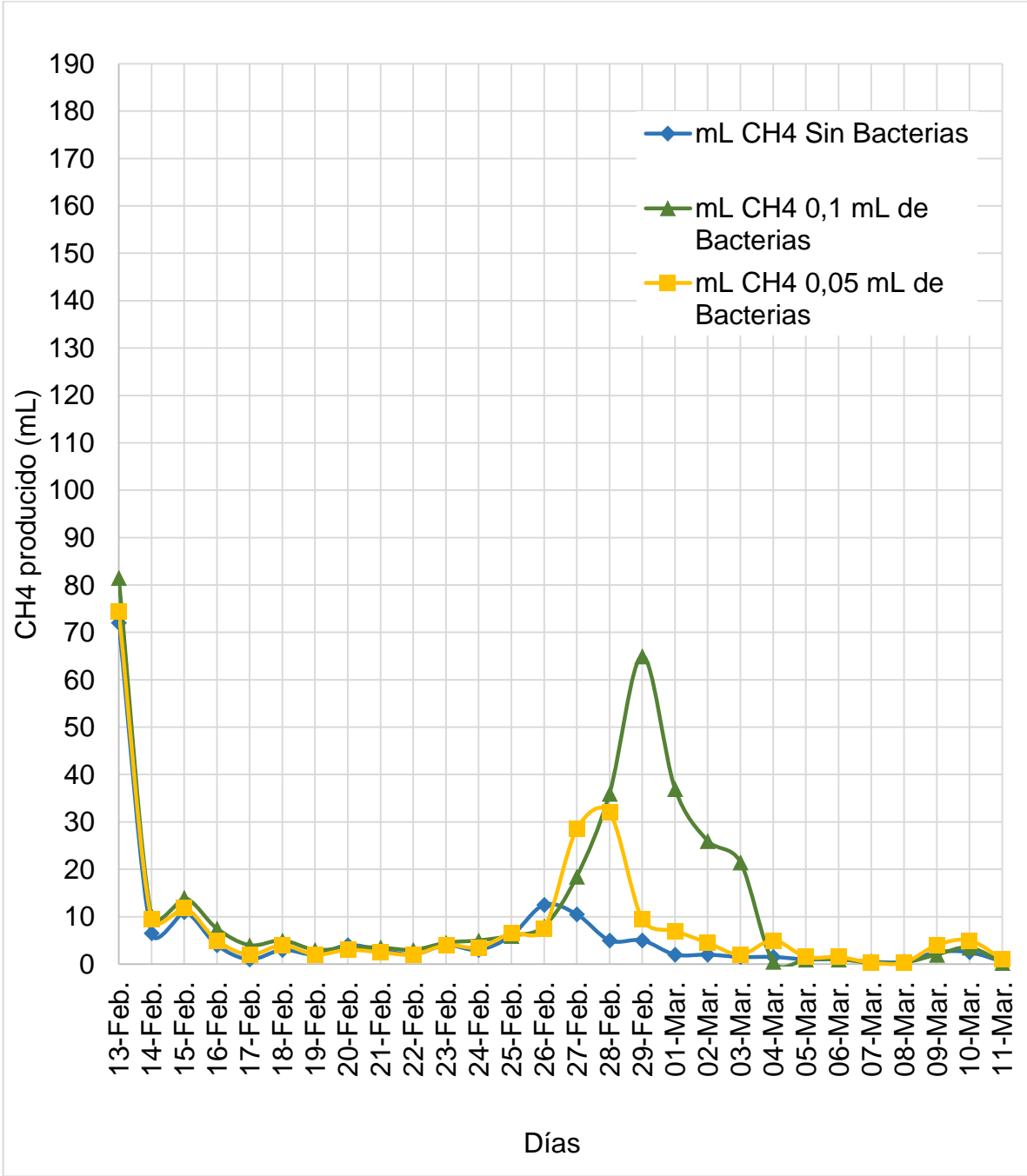
A continuación, se muestra la producción diaria de cada uno de los ensayos.

Gráfico 12: Producción diaria de CH<sub>4</sub> en Ensayos a 37°C (año 2016)



Fuente: (Elaboración Propia)

Gráfico13: Producción diaria de CH<sub>4</sub> en Ensayos a Temperatura Ambiente (Año 2016)



Fuente: (Elaboración Propia)

Los ensayos que se mantuvieron a 37°C muestran una alta producción de CH<sub>4</sub> durante los primeros días, la que fue disminuyendo salvo dos incrementos pequeños los días 23 y 29 de febrero. Este tipo de comportamiento es característico de los reactores discontinuos batch, una curva de descenso continuo. En el caso de los ensayos que se mantuvieron a temperatura ambiente la producción fue mucho menor pero se aprecia un comportamiento similar los cuatro primeros días. Mantuvieron un comportamiento constante, salvo entre los días 26 de febrero y 4 de marzo donde existió un incremento considerable en la producción.

La producción total (acumulada) de CH<sub>4</sub> para cada arreglo es mostrada en la Tabla 17 y en los Gráficos 14 y 15.

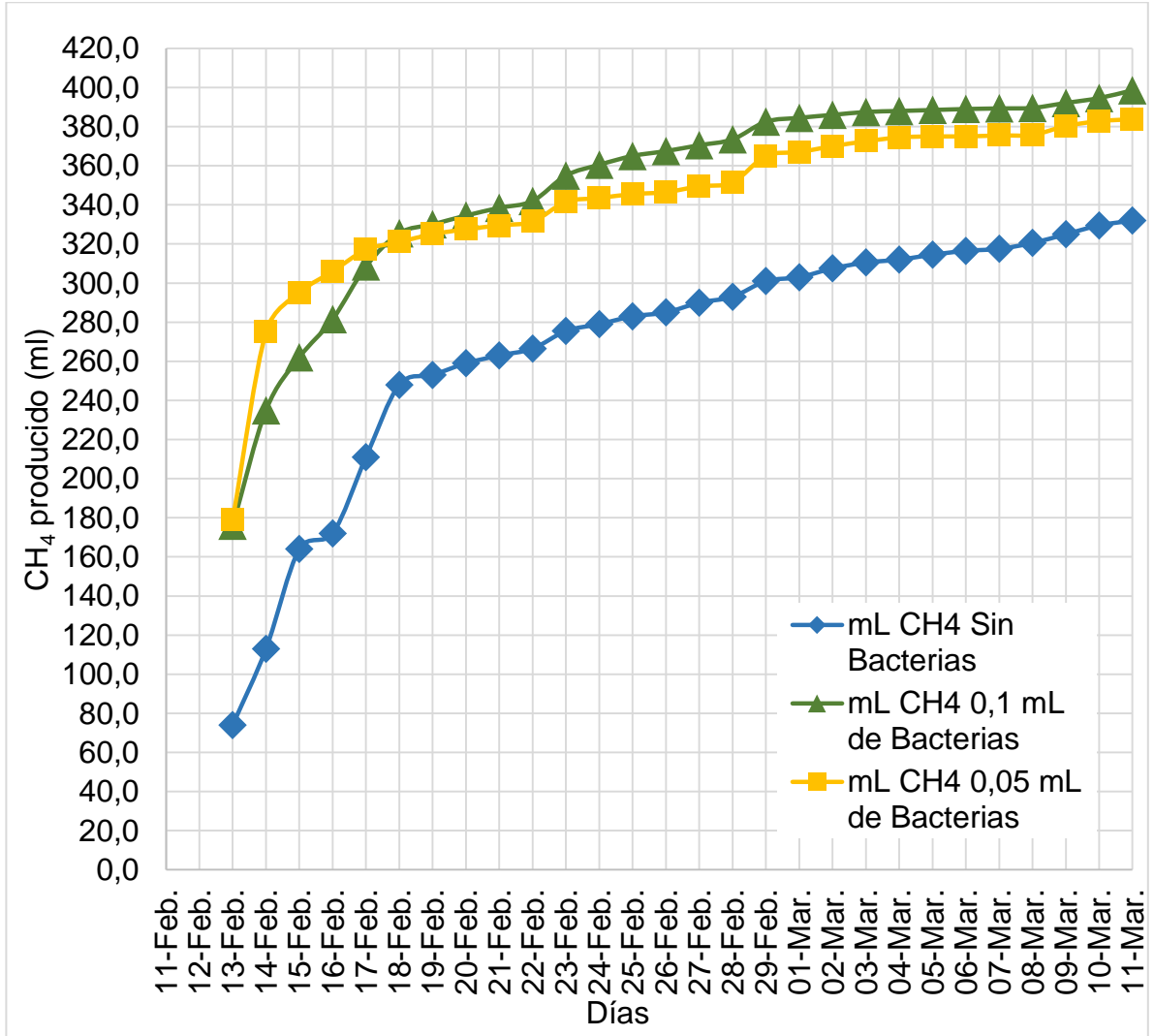
Tabla 17: Producción de CH<sub>4</sub> Acumulado

Ensayos a 37°C (ml CH <sub>4</sub> )			Ensayos a Temperatura Ambiente (ml CH <sub>4</sub> )		
Sin Bacterias	0,05 ml de Bacterias	0,1 ml de Bacterias	Sin Bacterias	0,05 ml de Bacterias	0,1 ml de Bacterias
332,0	383,8	398,6	170,0	240,1	371,6

Fuente: (Elaboración Propia)

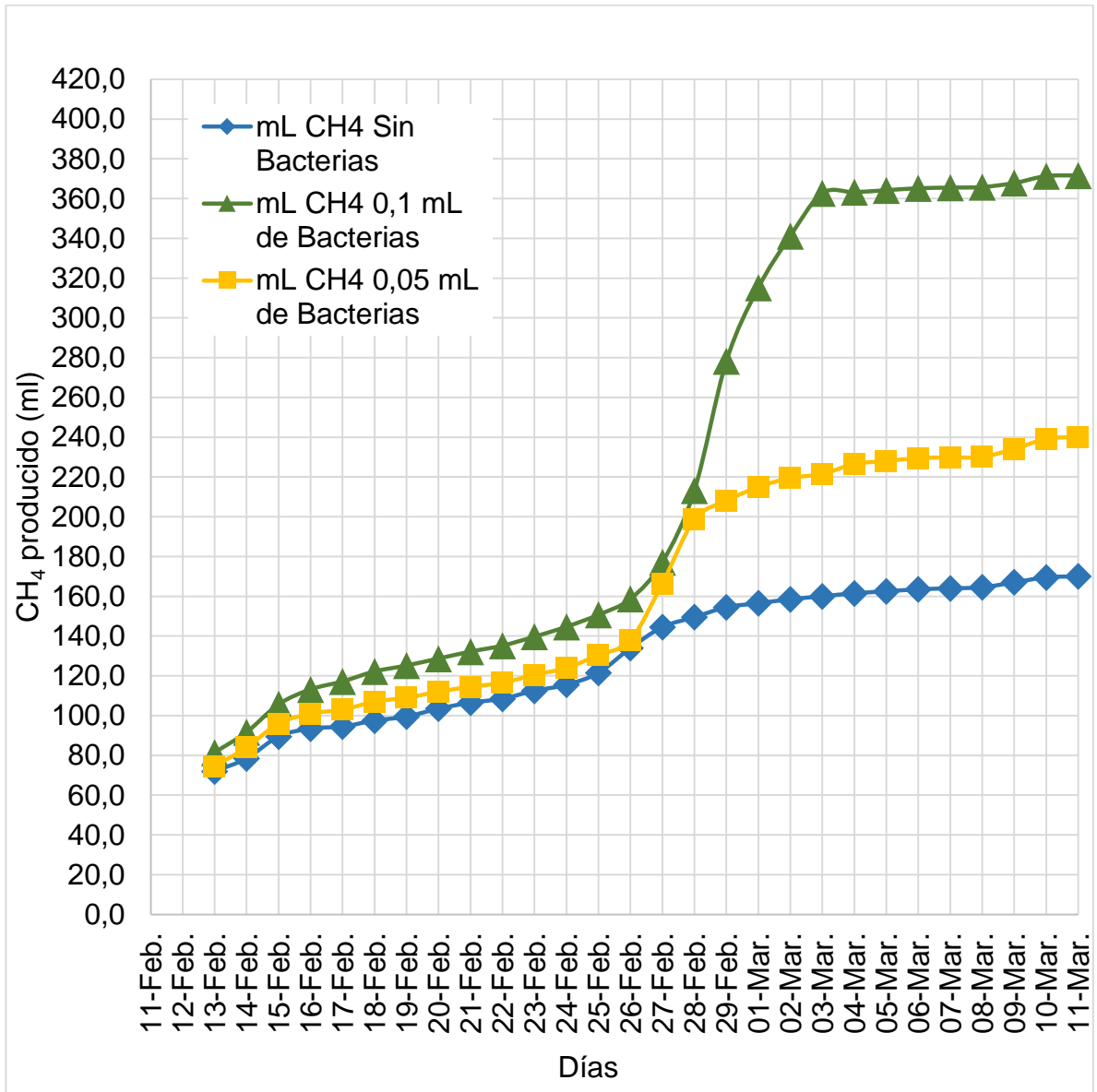
Como se puede apreciar los ensayos que tuvieron mayor producción de CH<sub>4</sub> para cada arreglo son los que contenían mayor cantidad de bacterias, de hecho en el ensayo a temperatura ambiente con 0,1 ml de bacterias se produjo más CH<sub>4</sub> que el ensayo sin bacterias a 37°C.

Gráfico 14: ml CH<sub>4</sub> Producido Acumulado en los Ensayos a 37°C (año 2016)



Fuente: (Elaboración Propia)

Gráfico 15: ml CH<sub>4</sub> Producido Acumulado en los Ensayos a Temperatura Ambiente (año 2016)



Fuente: (Elaboración Propia)

Se nota un comportamiento similar en los ensayos que se mantuvieron a 37°C, a pesar de que existe diferencia de producción en cada uno de ellos, esta no fue

tan notoria. La producción se mantuvo más o menos constante desde el primer día a diferencia de los ensayos que estuvieron a temperatura ambiente que recién a mitad del periodo de evaluación, durante el incremento de los días 26 de febrero y 4 de marzo, comenzaron a producir significativamente más CH<sub>4</sub>. El comportamiento de producción entre estos ensayos también se muestra bastante similar, aunque la diferencia de producción entre cada uno de ellos es mucho más significativa. Esto puede deberse a que las bacterias actúan mejor a temperaturas menores a 30°C, por lo que su efecto se pudo apreciar mejor en esos ensayos.

En Tabla 18 se presenta un resumen comparativo de los resultados de los ensayos físico-químicos correspondiente a los valores finales encontrados para cada ensayo.

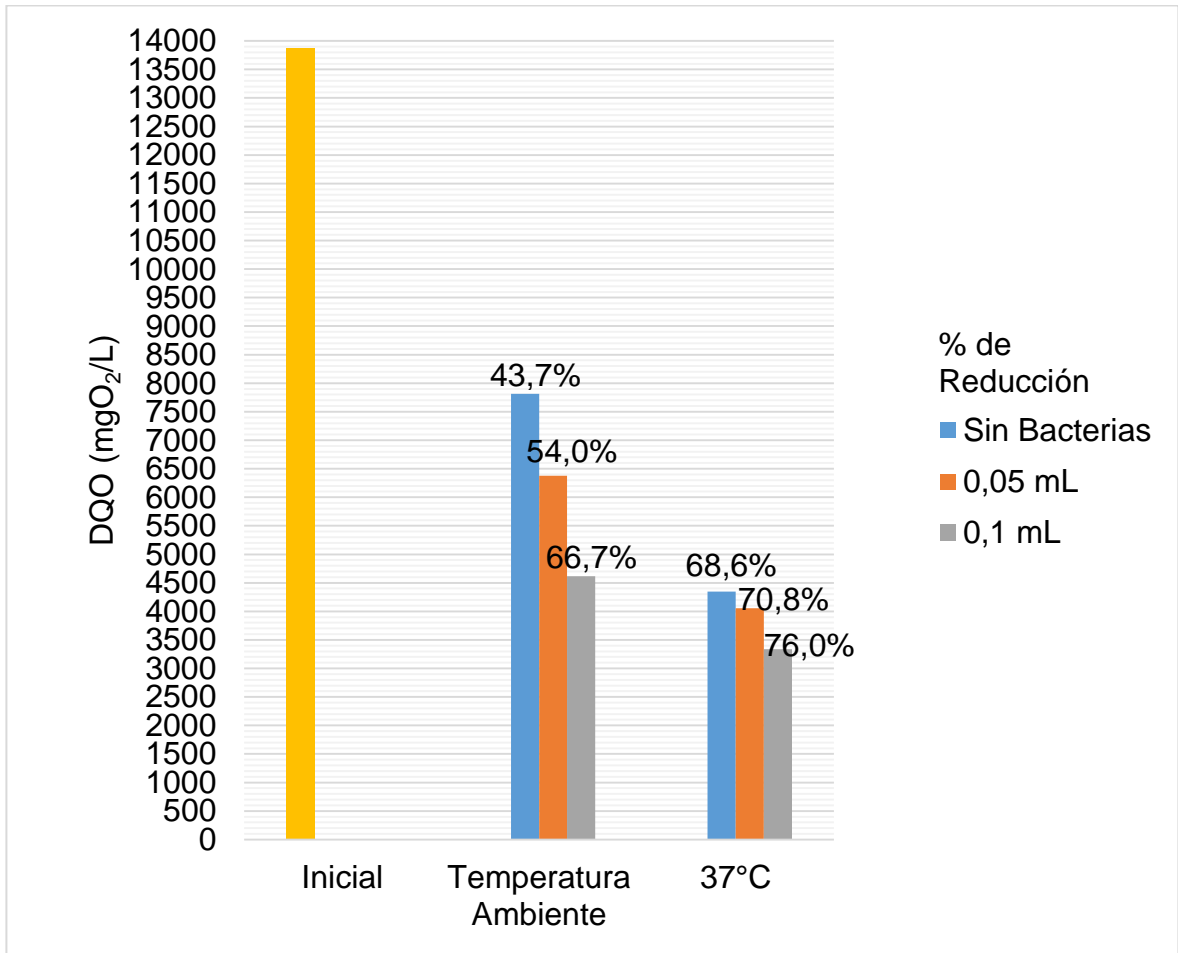
Tabla 18: Resultados Análisis Físico-Químicos después del tratamiento

Ensayo		Parámetros		
		Sólidos Totales (%)	Sólidos Volátiles (%)	DQO (mgO <sub>2</sub> /L)
37°C	Sin Bacterias	16,75	13,25	4.349
	0,05 ml de Bacterias	14,52	12,12	4.056
	0,1 ml de bacterias	10,30	8,80	3.336
T.A.	Sin Bacterias	17,05	14,15	7.816
	0,05 ml de Bacterias	15,52	12,55	6.376
	0,1 ml de Bacterias	11,72	9,35	4.616

Fuente: (Elaboración Propia)

En los gráficos siguientes se puede ver cómo afectó el tratamiento en los distintos parámetros analizados. En general se cumple para cada uno de ellos que los ensayos a 37°C fueron más efectivos, disminuyendo la DQO un 76,0% en el ensayo más efectivo (Con 0,1 ml de bacterias a 37°C).

Grafico 16: Resultados de los análisis de Demanda Química de Oxígeno para cada ensayo



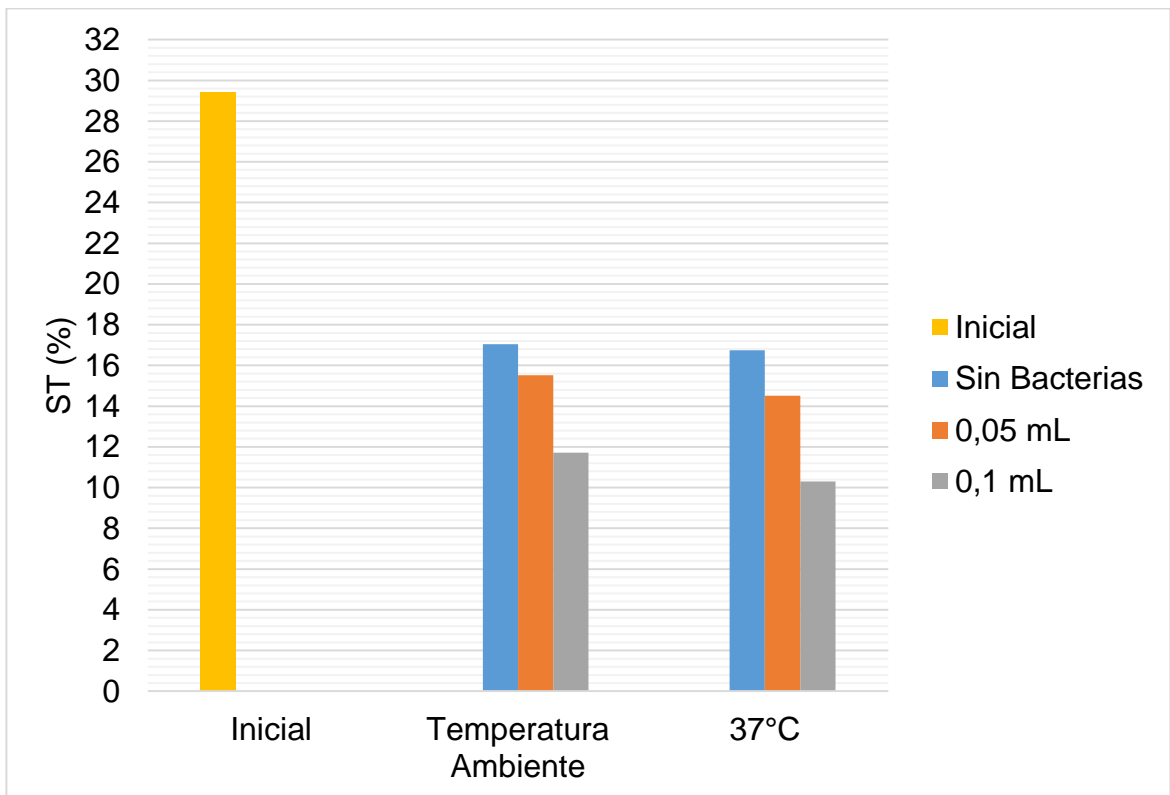
Fuente: (Elaboración Propia)

La disminución de la DQO significa una baja considerable en los olores del lodo resultante. En los Gráficos 17 y 18 se observa la disminución en cuanto a porcentaje de sólidos.

En términos generales, las características organolépticas y el aspecto visual de los materiales evaluados son menos desagradables que al inicio del tratamiento,

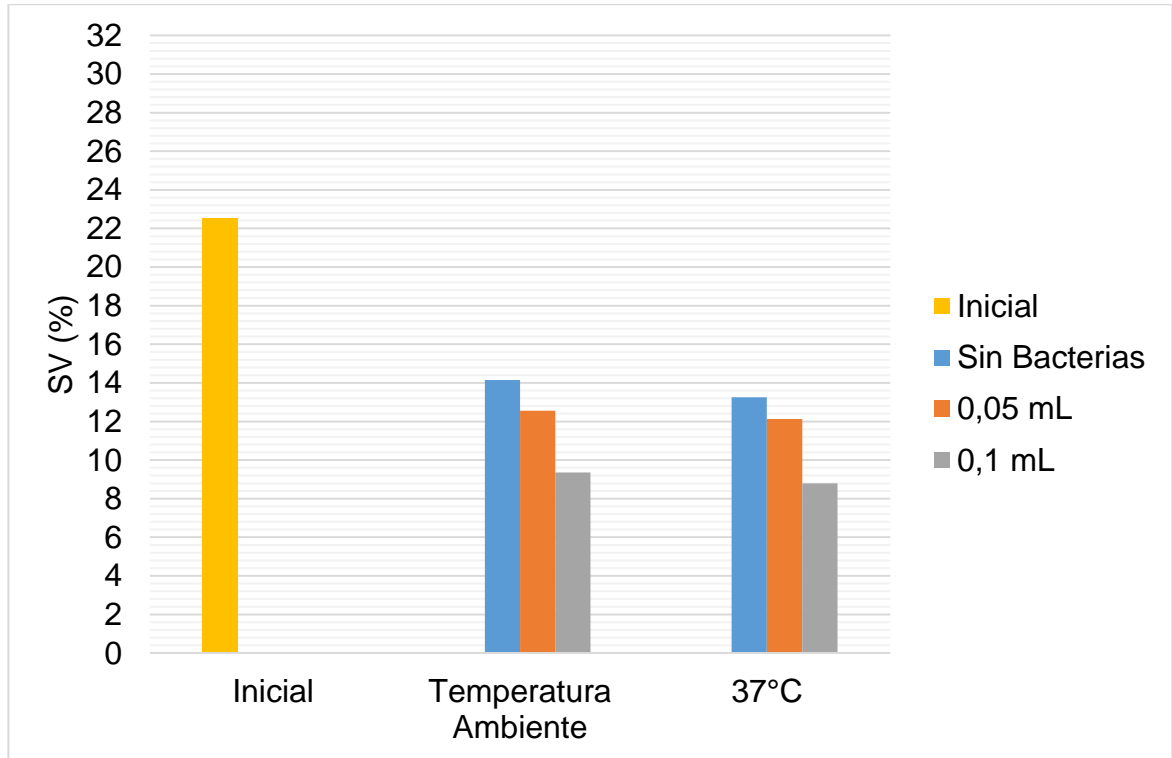
especialmente en cuanto a olor. A pesar del elevado contenido de humedad y prolongado período de retención sin agitación, no se presentó una separación de fases lo suficientemente acentuada como para permitir su evaluación por separado. Por tanto, el manejo del lodo se puede hacer como un solo material.

Gráfico 17: Resultado de los análisis de Sólidos Totales para cada ensayo



Fuente: (Elaboración Propia)

Gráfico18: Resultado de los análisis de Sólidos Volátiles para cada ensayo



Fuente: (Elaboración Propia)

Por otro lado, en términos energéticos fue necesario estimar la cantidad de energía en kilocalorías (kcal) que se produce en cada ensayo para así ver su factibilidad como método de calefacción. Considerando el poder calorífico del  $\text{CH}_4$  ( $8.843 \text{ kcal/m}^3$ ) se obtuvieron los siguientes resultados para cada ensayo realizado.

Tabla 19: Producción de Energía por ensayo (kcal)

Ensayos a 37°C			Ensayos a Temperatura Ambiente		
Sin Bacterias	0,05 ml de Bacterias	0,1 ml de Bacterias	Sin Bacterias	0,05 ml de Bacterias	0,1 ml de Bacterias
2,93	3,39	3,52	1,50	2,12	3,28

Fuente: (Elaboración Propia)

### 3.6. Análisis de factibilidad económica y ambiental

#### 3.6.1. Diseño del biodigestor

Según los datos reunidos tanto por bibliografía como en la parte experimental se puede obtener lo siguiente:

##### a) Cantidad de estiércol:

El Fundo dispone de 48 vacas lecheras, si cada una genera 46 kg de estiércol al día, en total se dispondrá de 2.208 kg/día.

##### b) Materia a digerir:

Para el experimento se utilizó además del estiércol bovino una parte de desechos orgánicos en relación 1:1. Sin embargo, viendo la cantidad de estiércol que se produce en el Fundo se hace difícil conseguir tal cantidad de desechos orgánicos de cocina al día. Por esta razón no se considerará dentro del diseño este volumen, pero sí un volumen extra para añadir los desechos con que se cuente al día y mejorar en cuanto se pueda la relación de nutrientes a una escala realista.

Por otro lado, según la proporción de agua utilizada para el experimento la materia a digerir final sería:

Tabla 20: Composición Mezcla a Digerir

Tipo	Cantidad Ensayo	Cantidades Finales
Residuos del Fondo	0,055 kg	2.208 kg
Agua	30 ml	1,204 m <sup>3</sup>

Fuente: (Elaboración Propia)

No se recomienda el uso y aplicación de agua libre, es preferible reciclar el agua procedente del propio biodigestor cuando esté en operación.

**c) Tiempo de retención (TRH):** La duración del experimento fue de 28 días, el tiempo de retención a considerar para el diseño del biodigestor será de 30 días. Por otro lado, según bibliografía la densidad media aparente del estiércol bovino 993 (kg/m<sup>3</sup>), por lo que 2.208 kg serían 2,2 m<sup>3</sup>. A este valor se le suma el agua que se debe adicionar y tendremos el volumen de carga, que corresponde a 3,4 m<sup>3</sup>.

**d) Volumen del tanque de alimentación y del digestor:**

De acuerdo a los datos obtenidos anteriormente podemos sacar los volúmenes del tanque de alimentación y del digestor.

Se aplica la Ecuación 3, considerando que el digestor se alimenta cada 6 horas.

$$V_t = \frac{V_{mezcla}}{6} \cdot 3$$

$$V_t = \frac{3,4 \text{ m}^3}{6} \cdot 3$$

$$V_t = 1,7 \text{ m}^3$$

Para el cálculo del volumen del biodigestor usamos la Ecuación 2, considerando la adición del 20% del volumen total para el almacenamiento de biogás se obtiene:

$$V_d = (V_{mezcla} \cdot TRH) + \text{Volumen Gaseoso}$$

$$V_d = (3,4 \text{ m}^3 \cdot 30) + 20,5 \text{ m}^3$$

$$V_d = 122,5 \text{ m}^3$$

Tabla 21: Resumen Volúmenes

Volúmenes de carga	Cantidad en m <sup>3</sup>
Volumen diario de carga	3,4
Volumen líquido (Volumen diario x TRH)	102
Volumen gaseoso (+20% del volumen total)	20,5
Volumen tanque de alimentación	1,7
Volumen digestor	122,5

Fuente: (Elaboración Propia)

**e) Dimensionamiento:**

Se define una profundidad de 1,5 metros para el dimensionamiento del taque de alimentación, utilizando además la relación 2:1 para el largo y ancho. Ocupando la Ecuación

$$L_t = \sqrt{\left[ \left( \frac{1,7 \text{ m}^3}{1,5 \text{ m}} \cdot 2 \right) \right]}$$

$$L_t = 1,5 \text{ m}$$

$$A_t = \frac{1,7 \text{ m}^3}{1,5 \text{ m} \cdot 1,5 \text{ m}}$$

$$A_t = 0,8 \text{ m}$$

Para el dimensionamiento del biodigestor se tomará como profundidad 2,5 metros y 5 metros de ancho. Por tanto, para que se cumpla la relación 2:1 para el largo y el ancho debe quedar como se detalla en la Tabla 22.

Tabla 22: Dimensiones Tanque de Alimentación y Biodigestor

	Tanque de alimentación (m)	Biodigestor (m)
Ancho	0,8	5
Largo	1,5	10
Profundidad	1,5	2,5

Fuente: (Elaboración Propia)

**f) Requerimiento de fierro para el hormigón:**

Para calcular cuánto fierro necesitamos para los verticales ocupamos la siguiente ecuación:

$$Fe6 = \left( \frac{A_d \cdot 2 + L_d}{0,15 [m]} + 1 \right) \cdot 2$$

$$Fe6 = \left( \frac{5 [m] \cdot 2 + 10 [m]}{0,15 [m]} + 1 [m] \right) \cdot 2$$

$$Fe6 = 268,6 [m]$$

$$fe6k = Fe6 \cdot 0,222 [kg/m]$$

$$fe6k = 268,6 [m] \cdot 0,222 [kg/m]$$

$$fe6k = 59,6 [kg]$$

Para los cálculos de los horizontales del hormigón armado utilizamos la siguiente

Ecuación:

$$Fe8 = \left( \frac{L_d}{0,15 m} + 1 \right)$$

$$Fe8 = \left( \frac{10 [m]}{0,15 [m]} + 1 \right) \cdot 2$$

$$Fe8 = 135 [m]$$

$$fe8k = 135 [m] \cdot 0,4 kg/m$$

$$fe8k = 54 kg$$

**g) Calculo de tuberías de calefacción:**

Se debe cubrir un 75% del volumen a calentar, la instalación debe comenzar a 0,25 metros del fondo para el tanque de alimentación y 0,5 metros para el digestor.

Para el tanque de alimentación obtenemos:

$$Prof Masa = \frac{1,7 [m^3]}{1,5 [m] \cdot 0,8 [m] \cdot 4}$$

$$Prof Masa = 0,3 [m]$$

$$hileras = \frac{0,3 [m] - 1,5[m]}{0,25}$$

$$hileras = 4,8 \approx 5$$

Para saber la cantidad en metros de tuberías se aplica la siguiente función de cálculo:

$$Tuberías = [(1,5 [m] \cdot 5) \cdot 2 + (0,8 [m] \cdot 5 \cdot 2)] \cdot 1,25$$

$$Tuberías = 28,75 [m]$$

Para los digestores se considera la carga diaria por el tiempo de retención hidráulico y se aplica la siguiente función de cálculo:

$$Prof Masa = \frac{3,5 [m^3] \cdot 30}{6,5 [m] \cdot 6,3 [m]}$$

$$Prof Masa = 2,5 [m]$$

$$hileras = \frac{2,5 [m] - 3 [m]}{0,25}$$

$$hileras = 2$$

Para saber la cantidad en metros de tuberías se aplica la siguiente función de cálculo:

$$Tuberías = [(L_d \cdot hileras) \cdot 2 + (A_d \cdot hileras \cdot 2)] \cdot 1,25$$

$$Tuberías = [(10 [m] \cdot 2) \cdot 2 + (5 [m] \cdot 2 \cdot 2)] \cdot 1,25$$

$$Tuberías = 75 [m]$$

Por tanto, son necesarios 103,75 m de tuberías para calefacción.

### **3.6.2. Factibilidad económica**

Durante esta etapa del estudio se realizó un escalamiento con datos reales obtenidos del Fundo Huenimiao para conocer los verdaderos volúmenes, y así, la producción de energía que se puede obtener.

En primer lugar se realizó un análisis de costos para la construcción del biodigestor y así conocer la inversión inicial necesaria. Estos valores se detallan en la Tabla 20.

Tabla 23: Detalle de la Inversión Inicial

Movimiento de tierras	Unidad	Cantidad	Precio Unidad	Total
Replanteo y nivelación de estructuras	m <sup>2</sup>	100	\$25.000	\$25.000
Excavación a maquina	m <sup>3</sup>	273	\$25.000	\$100.000
Relleno compacto	m <sup>3</sup>	7	\$25.000	\$25.000
Acarreo Mecánico	m <sup>3</sup>	266	\$35.000	\$140.000
TOTAL				\$290.000

Estructuras	Unidad	Cantidad	Precio Unidad	Total
Hormigón	m <sup>3</sup>	26	\$55.000	\$1.430.000
Acero Verticales	Kg	59,6	\$700	\$26.600
Acero Horizontales	Kg	54	\$850	\$29.750
Alambre Amarre	unidad	2	\$11.360	\$22.720
Tableros	unidad	20	\$20.000	\$400.000
Palos 2x3	unidad	10	\$1.000	\$10.000
Enlucido y estuco térmico	m <sup>3</sup>	4	\$25.000	\$100.000
Revestimiento Epoxico digestor	unidad	200	\$23.000	\$184.000
Geomembrana HPDE 1 mm	m <sup>2</sup>	15	\$2.500	\$37.500
Platina 50 x 5 mm	M	40	\$9.000	\$63.000
Clavos, pernos, tornillos y otros		1	\$100.000	\$100.000
TOTAL				\$2.403.570

Tuberías y Accesorios	Unidad	Cantidad	Precio Unidad	Total
Tubería de carga y descarga 140 mm	m	1	\$20.187	\$20.187
Tubería calefacción 25 mm	m	104	\$3.500	\$325.500
Tubería de PVC 50 mm	m	14	\$3.745	\$18.725
Codo 45° PVC 50 mm	unidad	6	\$720	\$4.320
Tubería de acero 50 mm	unidad	6	\$37.390	\$112.170
Válvula de cierre	m	5	\$4.715	\$23.575

Medidor de caudal (biogás) 50 mm	unidad	1	\$2.700	\$2.700
Termostato	unidad	1	\$3.000	\$3.000
Compuerta de hierro galvanizado tanque de mezcla	unidad	2	\$12.000	\$24.000
Pintura amarilla tuberías biogás	unidad	1	\$10.000	\$10.000
Accesorio varios, llaves menores, codos, T, etc	unidad	1	\$50.000	\$50.000
TOTAL				\$594.177

Equipo Electromecánico	Unidad	Cantidad	Precio Unidad	Total
Calefactor Caldera	unidad	1	\$500.000	\$500.000
Bomba transporte de purines	unidad	1	\$500.000	\$500.000
Bomba alimentación de H <sub>2</sub> O	unidad	1	\$100.000	\$100.000
Agitador 0,5 hp y recirculador	unidad	1	\$75.000	\$75.000
TOTAL				\$1.175.000

Edificaciones	Unidad	Cantidad	Precio Unidad	Total
Galpones Casa de Maquinas	unidad	1	\$500.000	\$500.000

Total Proyecto con temperatura (37°C)	\$4.462.747
---------------------------------------	-------------

Fuente: (Homecenter Sodimac, 2016)

En segundo lugar se analizó la demanda energética del sector, en cuanto a leña utilizada para calefaccionar y el gasto que significa adquirirla. Datos que se encuentran en la siguiente Tabla.

Tabla 24: Consumo de Leña en la Región de Los Lagos

Consumo por Hogar al Año	13 (m <sup>3</sup> /año)
Consumo de Leña al día <sup>10</sup>	0,04267 (m <sup>3</sup> /día)
Energía Consumida al día	53.489,4 (kcal/día)
Gasto al día	\$1.068
Gasto al año <sup>11</sup>	\$390.000

Fuente: (Elaboración Propia)

Energéticamente se necesitan 53.489,4 kcal al día para cumplir con la demanda de energía que un hogar ocupa para calefacción. Se consideró un uso de calefactor de 10 horas, tomando en cuenta que en temporada de invierno se ocupa calefacción la mayor parte del día.

Con la cantidad de residuo que se genera diariamente en el Fundo es posible cumplir con la demanda que requiere suplir la leña como calefacción. Podemos ver que en el arreglo que generaba menos energía es capaz de producir la necesaria con menos vacas de lo que se dispone, por lo que dando un uso a todos los residuos que se generan al día, sobra energía que puede ser utilizada para otros fines, como cocina o ACS. Considerando que además de biogás se genera digestato, que como se ha mencionado en incisos anteriores tiene potencial de fertilizante, puede considerarse un emprendimiento que suplirá en su totalidad el gasto del producto bacteriano que mejora la producción de biogás obteniéndose grandes ganancias. En la Tabla 25 se muestra la cantidad de digestato que se produce según los datos experimentales en la Finca de 48 vacas.

---

<sup>10</sup> Considerando un mes de invierno en donde se consumen al mes 1,28 m<sup>3</sup> por hogar.

<sup>11</sup> Considerando que se adquiere mayormente el formato de m<sup>3</sup> de leña, que actualmente cuesta \$30.000. Como fue detallado en incisos anteriores.

Tabla 25: Gasto asociado a suplir la demanda energética del reemplazo de leña

	Metano producido a 37°C		
	Sin Bacterias	0,05 ml de Bacterias	0,1 ml de Bacterias
N° de vacas necesarias	21	18	18
Residuo (kg/día)	966	828	828
Generación CH <sub>4</sub> (m <sup>3</sup> /día)	5,83	5,78	6,00
Generación Energía (kcal/día)	51.564,7	51.094,28	53.064,56
Excedente Energía (kcal/día)	1.214,1	743,7	2.714,0
Gasto diario	-	\$3.415	\$6.588
Gasto al Año	-	\$1.246.392	\$2.404.582

	Metano producido a Temperatura Ambiente		
	Sin Bacterias	0,05 ml de Bacterias	0,1 ml de Bacterias
N° de vacas necesarias	41	29	19
Residuo (kg/día)	1.886	1.334	874
Generación CH <sub>4</sub> (m <sup>3</sup> /día)	5,83	5,82	5,91
Generación Energía (kcal/día)	51.549,87	51.497,36	52.218,46
Excedente Energía (kcal/día)	1.199,3	1.146,8	1.876,9
Gasto diario	-	\$5.275	\$6.588
Gasto al Año	-	\$1.925.532	\$2.404.584

Fuente: (Elaboración Propia)

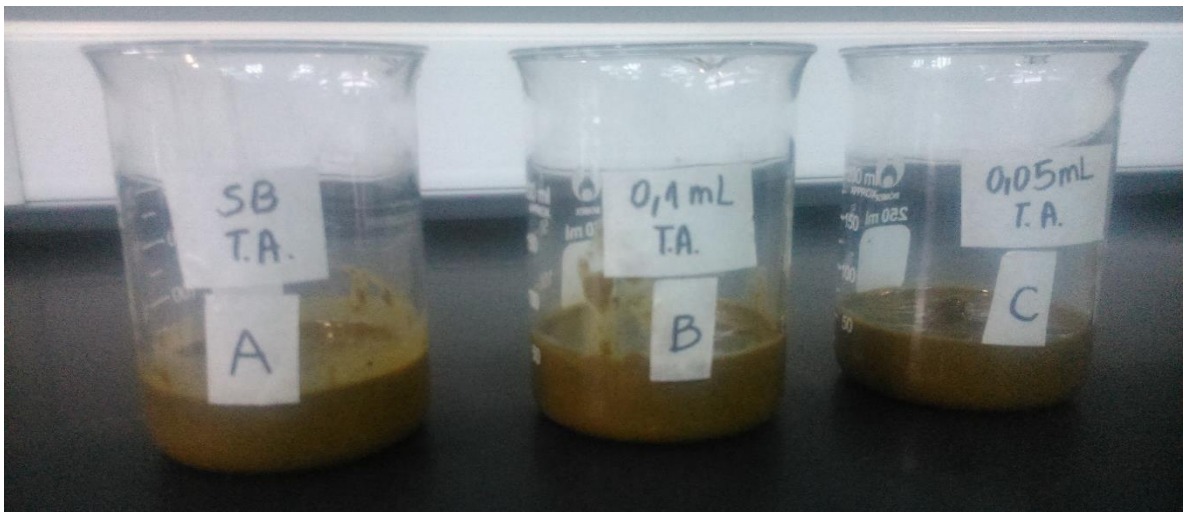
Se consideró el precio referencial para el año 2015 de la urea, éste fue de USD \$562 sin IVA una tonelada de fertilizante (ODEPA, 2015), esto fue llevado a pesos chilenos quedando en \$468 por kg con IVA incluido.

Tabla 26: Cantidad de Digestato Producido

Ensayos		Producción Ensayo (kg)	Producción (kg/día)	%	Venta (\$/año)
37°C	Sin Bacterias	0,0451	838	17%	\$ 24.179.024
	0,05 ml de Bacterias	0,0449	800	19%	\$ 25.798.200
	0,1 ml de Bacterias	0,0449	681	23%	\$ 26.584.027
Temperatura Ambiente	Sin Bacterias	0,0452	1.625	8%	\$ 22.064.250
	0,05 ml de Bacterias	0,0452	1.134	12%	\$ 23.096.178
	0,1 ml de Bacterias	0,045	752	19%	\$ 24.250.308

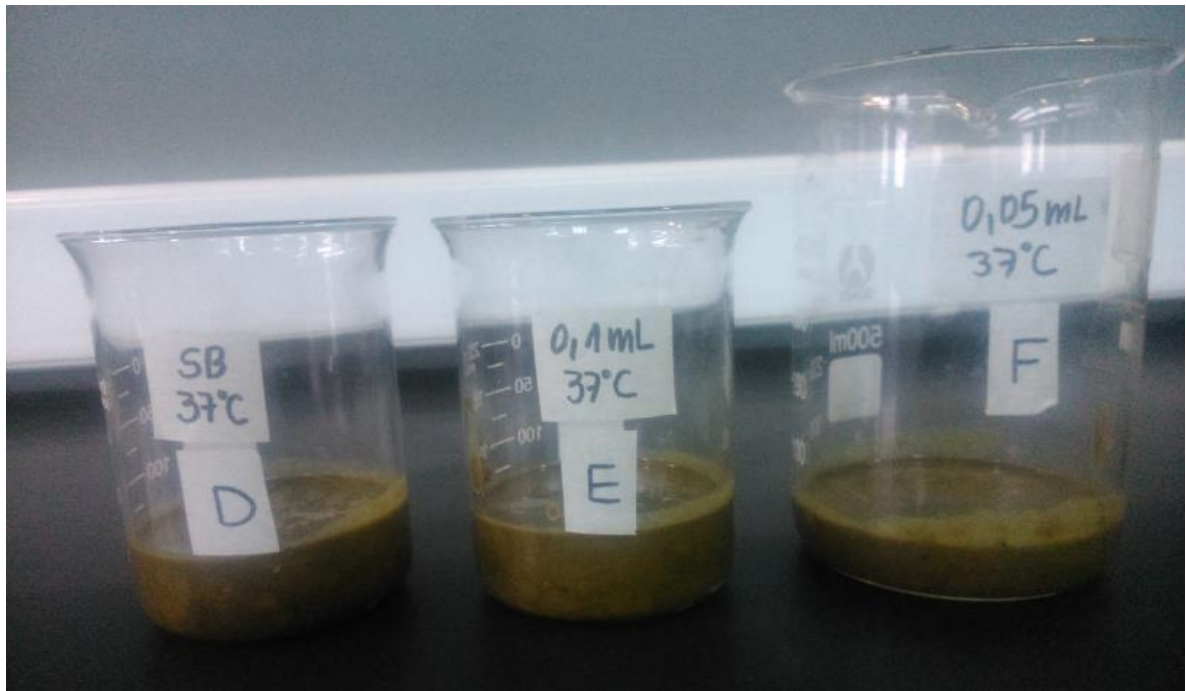
Fuente: (Elaboración Propia)

Imagen 4: Digestato ensayos a Temperatura Ambiente



Fuente: (Elaboración Propia)

Imagen 5: Digestato ensayos a 37°C



Fuente: (Elaboración Propia)

A continuación se muestra el análisis de producción de metano para cada arreglo. Cabe destacar que se estará ocupando en todos los casos la cantidad de residuos que son necesarios para reemplazar a la leña como combustible. En el Anexo 1 se detalla el flujo de caja para cada caso.

### 3.6.3. Arreglo Sin Bacterias a 37°C

En la Tabla 27 se puede ver la generación de metano, el consumo de leña y el gasto que supone su uso al año. Para generar esa cantidad de energía sólo se ocuparon los residuos de 22 vacas de las 48 que posee el Fundo, siendo un 46% de los residuos que se generan.

Tabla 27: Generación CH<sub>4</sub> vs Uso de Leña (Arreglo Sin Bacterias a 37°C)

	Metano Generado	Leña
Consumo/Generación	6,15 (m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /día)	0,04533 (m <sup>3</sup> /día)
Consumo/Generación Energía (kcal/día)	54.428,67	53.489,4
Excedente Energía (kcal/día)	939,67	-
Gasto Diario	-	\$1.068
Gasto al Año	-	\$390.000

Fuente: (Elaboración Propia)

Como se puede ver en la Tabla 25, los ingresos son mayores a los costos por lo que el proyecto es totalmente factible en el ámbito económico. Los costos totales corresponden a aquellos necesarios para el funcionamiento del biodigestor, costos de energía para la agitación, calefacción y costos de equipamientos.

Tabla 28: Gastos e Ingresos para el arreglo Sin Bacterias a 37°C

Ingresos	Unidad	Cantidad	Precio	Total
Venta Digestato	kg/año	305.870	\$ 468	\$ 24.179.024
Ahorro por reemplazo de combustible	m3/año	13	\$ 1.068	\$ 390.000
TOTAL INGRESOS				\$ 24.569.024
TOTAL COSTOS				\$ 22.901.530

A los tres años es posible recuperar la inversión realizada, considerando la venta de un 17% del digestato producido, siendo la Tasa de Retorno Inversión (TRI) de 0,144.

Los indicadores económicos para este escenario son los siguientes: VAN \$9.666.599,28 y TIR 35%.

### 3.6.4. Arreglo con 0,05 ml de Bacterias a 37°C

En la Tabla 29 se puede ver la generación de metano y el consumo de leña, además del gasto que supone su uso al año para el arreglo con 0,05 ml de bacterias con adición de temperatura. Para generar esa cantidad de energía sólo se ocuparon los residuos de 19 vacas de las 48 que posee el Fundo, siendo un 44% de los residuos que se generan en el fundo.

Tabla 29: Generación CH<sub>4</sub> vs Uso de Leña (Arreglo con 0,05 ml de Bacterias a 37°C)

	Metano Generado	Leña
Consumo/Generación	6,1 (m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /día)	0,04533 (m <sup>3</sup> /día)
Consumo/Generación Energía (kcal/día)	53.932,50	53.489,4
Excedente Energía (kcal/día)	443,5	-
Gasto Diario	\$ 3.425	\$1.068
Gasto al Año	\$1.246.392	\$390.000

Fuente: (Elaboración Propia)

Como se puede observar, los ingresos son mayores a los costos por lo que el proyecto es totalmente factible en el ámbito económico.

Tabla 30: Total ingresos al año por Reemplazo de Combustible y Venta de Fertilizante (Arreglo con 0,05 ml de Bacterias a 37°C)

Ingresos	Unidad	Cantidad	Precio	Total
Venta Digestato	kg/año	292.000	\$ 468	\$ 25.798.200
Ahorro por reemplazo de combustible	m3/año	13	\$ 1.068	\$ 390.000
TOTAL INGRESOS				\$ 26.188.200
TOTAL COSTOS				\$ 22.901.530

Fuente: (Elaboración Propia)

Dentro de los Costos se encuentran los asociados al uso de energía para agitación, calefacción, la mantención anual y a la compra de bacterias. A los dos años es posible recuperar la inversión realizada, considerando la venta de un 19% del digestato producido, siendo la Tasa de Retorno Inversión (TRI) de 0,121.

Los indicadores económicos para este escenario son los siguientes: VAN \$12.551.803,46 y TIR 41%.

### 3.6.5. Arreglo con 0,1 ml de Bacterias a 37°C

En la Tabla 31 se puede ver la generación de metano y el consumo de leña, además del gasto que supone su uso al año para el arreglo con 0,1 ml de bacterias con adición de temperatura. Para generar esa cantidad de energía sólo se ocuparon los residuos de 18 vacas de las 48 que posee el Fundo, que corresponde a un 38% de los residuos que se generan en el Fundo. Así, este arreglo es el que posee más oportunidad económica que los demás arreglos, ya que genera más energía por kg.

Tabla 31: Generación CH<sub>4</sub> vs Uso de Leña (Arreglo con 0,1 ml de Bacterias a 37°C)

	Metano Generado	Leña
Consumo/Generación	6,0 (m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /día)	0,04533 (m <sup>3</sup> /día)
Consumo/Generación Energía (kcal/día)	53.064,56	53.489,4
Excedente Energía (kcal/día)	-	-
Gasto Diario	\$ 6.588	\$1.068
Gasto al Año	\$ 2.404.582	\$390.000

Fuente: (Elaboración Propia)

Como se puede observar en la siguiente Tabla, los ingresos son mayores a los costos por lo que el proyecto es totalmente factible en el ámbito económico, a pesar del gasto que supone el uso de bacterias.

Tabla 32: Total ingresos al año por Reemplazo de Combustible y Venta de Fertilizante (Arreglo con 0,05 ml de Bacterias a 37°C)

Ingresos	Unidad	Cantidad	Precio	Total
Venta Digestato	kg/año	248.565	\$ 468	\$ 26.584.027
Ahorro por reemplazo de combustible	m3/año	13	\$ 1.068	\$ 390.000
TOTAL INGRESOS				\$ 26.974.027
TOTAL COSTOS				\$ 25.306.112

Fuente: (Elaboración Propia)

Dentro de los Costos se encuentran los asociados al uso de energía para agitación, calefacción, la mantención anual y la compra de bacterias. A los tres años es posible recuperar la inversión realizada, considerando la venta de un 23% del digestato producido, siendo la Tasa de Retorno Inversión (TRI) de 0,144.

Los indicadores económicos para este escenario son los siguientes: VAN \$9.669.859,59 y TIR 35%.

### 3.6.6. Arreglo Sin Bacterias a Temperatura Ambiente

En la Tabla 33 se puede ver la generación de metano y el consumo de leña, además del gasto que supone su uso al año para el arreglo con 0,1 ml de bacterias con adición de temperatura. Para generar esa cantidad de energía sólo se ocuparon los residuos de 41 vacas de las 48 que posee el Fundo, o sea, un 90% de los residuos generados en el Fundo. A pesar de ser la alternativa con la que se obtiene más retorno, ya que no hay gasto en bacterias y se ocupa menos calefacción que para mantener la mezcla a 37°C, es la que menos oportunidad económica tiene. Los residuos resultantes son sólo 230 kg lo que generaría sólo

6,5 m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/día en comparación con el arreglo con 0,1 ml de bacterias que genera 16 m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/día, además de lo ocupado para calefacción.

Tabla 33: Generación CH<sub>4</sub> vs Uso de Leña (Arreglo Sin Bacterias a Temperatura Ambiente)

	Metano Generado	Leña
Consumo/Generación	5,83 (m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /día)	0,04533 (m <sup>3</sup> /día)
Consumo/Generación Energía (kcal/día)	54.065,00	53.489,4
Excedente Energía (kcal/día)	576	-
Gasto Diario	-	\$1.068
Gasto al Año	-	\$390.000

Fuente: (Elaboración Propia)

Como se puede observar en la siguiente tabla, los ingresos son mayores a los costos por lo que el proyecto es totalmente factible en el ámbito económico.

Tabla 34: Total ingresos al año por Reemplazo de Combustible y Venta de Fertilizante (Arreglo con Sin Bacterias a 37°C)

Ingresos	Unidad	Cantidad	Precio	Total
Venta Digestato	kg/año	593.125	\$ 468	\$ 22.064.250
Ahorro por reemplazo de combustible	m <sup>3</sup> /año	13	\$ 1.068	\$ 390.000
TOTAL INGRESOS				\$ 22.454.250
TOTAL COSTOS				\$ 20.361.130

Fuente: (Elaboración Propia)

Dentro de los Costos se encuentran los asociados al uso de energía para agitación, la mantención anual y las bacterias. A los dos años es posible recuperar la inversión realizada, considerando la venta de un 8% del digestato producido, siendo la Tasa de Retorno Inversión (TRI) de 0,118.

Los indicadores económicos para este escenario son los siguientes: VAN \$12.960.779,58 y TIR 42%.

### 3.6.7. Arreglo con 0,05 ml de Bacterias a Temperatura Ambiente

En la Tabla 35 se puede ver la generación de metano y el consumo de leña, además del gasto que supone su uso al año para el arreglo con 0,05 ml de bacterias. Para generar esa cantidad de energía sólo se ocuparon los residuos de 29 vacas de las 48 que posee el Fondo, siendo un 63% de la totalidad de residuos generados en el Fondo.

Tabla 35: Generación CH<sub>4</sub> vs Uso de Leña (Arreglo 0,05 ml de bacterias a Temperatura Ambiente)

	Metano Generado	Leña
Consumo/Generación	5,82 (m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /día)	0,04533 (m <sup>3</sup> /día)
Consumo/Generación Energía (kcal/día)	53.273,13	53.489,4
Excedente Energía (kcal/día)	-	-
Gasto Diario	\$5.275	\$1.068
Gasto al Año	\$1.925.532	\$390.000

Fuente: (Elaboración Propia)

Como se puede observar en la siguiente tabla, los ingresos son mayores a los costos por lo que el proyecto es totalmente factible en el ámbito económico.

Tabla 36: Total ingresos al año por Reemplazo de Combustible y Venta de Fertilizante (Arreglo con 0,05 ml de Bacterias a Temperatura Ambiente)

Ingresos	Unidad	Cantidad	Precio	Total
Venta Digestato	kg/año	593.125	\$ 468	\$ 23.096.178
Ahorro por reemplazo de combustible	m3/año	13	\$ 1.068	\$ 390.000
TOTAL INGRESOS				\$ 48.507.038
TOTAL COSTOS				\$ 23.486.178

Fuente: (Elaboración Propia)

Dentro de los Costos se encuentran los asociados al uso de energía para agitación y la mantención anual. En cuatro años es posible recuperar la inversión realizada, considerando la venta de un 12% del digestato producido, siendo la Tasa de Retorno Inversión (TRI) de 0,192.

Los indicadores económicos para este escenario son los siguientes: VAN \$6.044.639,04 y TIR 26%. Sin embargo la oportunidad económica de usar la totalidad de residuos es mucho menor pues es necesario usar más residuos para generar la cantidad de energía necesaria para reemplazar la leña como método de calefacción.

### **3.6.8. Arreglo con 0,1 ml de Bacterias a Temperatura Ambiente**

En la Tabla 37 se puede ver la generación de metano y el consumo de leña, además del gasto que supone su uso al año para el arreglo con 0,1 ml de bacterias a temperatura ambiente. Para generar esa cantidad de energía sólo se ocuparon los residuos de 19 vacas de las 48 que posee el Fundo, lo que corresponde a un 42% de los residuos generados en el Fundo.

Tabla 37: Generación CH<sub>4</sub> vs Uso de Leña (Arreglo Sin Bacterias a Temperatura Ambiente)

	Metano Generado	Leña
Consumo/Generación	5,91 (m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /día)	0,04533 (m <sup>3</sup> /día)
Consumo/Generación Energía (kcal/día)	54.966,80	53.489,4
Excedente Energía (kcal/día)	1.477,8	-
Gasto Diario	\$6.588	\$1.068
Gasto al Año	\$2.404.584	\$390.000

Fuente: (Elaboración Propia)

Como se puede observar en la siguiente tabla, los ingresos son mayores a los costos por lo que el proyecto es totalmente factible en el ámbito económico.

Tabla 38: Total ingresos al año por Reemplazo de Combustible y Venta de Fertilizante (Arreglo con 0,05 ml de Bacterias a 37°C)

Ingresos	Unidad	Cantidad	Precio	Total
Venta Digestato	kg/año	274.480	\$ 468	\$ 24.640.308
Ahorro por reemplazo de combustible	m <sup>3</sup> /año	13	\$ 1.068	\$ 390.000
TOTAL INGRESOS				\$ 24.640.308
TOTAL COSTOS				\$ 22.765.714

Fuente: (Elaboración Propia)

Dentro de los Costos se encuentran los asociados al uso de energía para agitación y la mantención anual. A los tres es posible recuperar la inversión realizada, considerando la venta de un 19% del digestato producido, siendo la Tasa de Retorno Inversión (TRI) de 0,130.

Los indicadores económicos para este escenario son los siguientes: VAN \$11.269.475,01 y TIR 38%.

### **3.6.9. Resumen de Ingresos y Costos para los arreglos propuestos.**

Si bien los arreglos que no contenían bacterias fueron los más rentables al generar la energía que es necesaria para reemplazar la leña como método de calefacción, son los que menos oportunidad económica tuvieron. Esto ya que se ocupó más residuo para generar la misma cantidad de energía que los arreglos con bacterias, si se llegara a comercializar la energía y el digestato producido con los residuos restantes los arreglos con bacterias tienen más beneficio económico.

La Tabla 39 contiene un resumen de los resultados obtenidos para los ensayos a 37°C, la cantidad de digestato que es necesario vender para que el proyecto sea rentable, junto con indicadores económicos y una proyección sobre la venta del 50% de la energía que se puede producir con los residuos restantes. Los precios se escogieron de acuerdo al comercio de gas licuado en la Región de Los Lagos<sup>12</sup>, bajando el precio en un 20% para competir mejor con el mercado ya existente.

---

<sup>12</sup> Sitio [www.bencinaenlinea.cl](http://www.bencinaenlinea.cl) que contiene los datos actualizados de precios de gas licuado en las distintas regiones y comunas del país.

Tabla 39: Resumen Ingresos y Gastos Ensayos a 37°C

	Metano producido a 37°C		
	Sin Bacterias	0,05 ml de Bacterias	0,1 ml de Bacterias
N° de vacas necesarias	22	19	18
Cantidad Residuo (kg)	1.019	974	828
Energía Generada (kcal/día)	6,15	6,10	6,00
Venta del Digestato	17%	19%	23%
Ingresos Anuales	\$ 24.569.024	\$ 26.188.200	\$ 26.974.027
Costos Anuales	\$ 22.901.530	\$ 24.147.922	\$ 25.306.112
Flujo Anual	\$ 1.890.631	\$ 2.263.415	\$ 1.891.052
VAN	\$ 9.666.599,28	\$ 12.551.803,46	\$ 9.669.859,59
TIR	35%	41%	35%
Residuos Sobrantes (kg)	1.189	1.234	1.380
Energía (kcal/día)	13,33	13,83	16,00
Venta Energía	\$ 3.085.648	\$ 3.201.389	\$ 3.703.704
Ingresos	\$ 28.667.879	\$ 33.178.890	\$ 44.956.711
Costos	\$ 26.722.197	\$ 30.593.979	\$ 42.176.853
Flujo	\$ 21.794.356	\$ 38.881.978	\$ 42.901.314

Fuente: (Elaboración Propia)

Tabla 40: Resumen Ingresos y Gastos Ensayos a Temperatura Ambiente

	Metano producido a Temperatura Ambiente		
	Sin Bacterias	0,05 ml de Bacterias	0,1 ml de Bacterias
N° de vacas necesarias	41	29	19
Cantidad Residuo (kg)	1.978	1.380	920
Energía Generada (kcal/día)	5,83	5,82	5,91
Venta del Digestato	8%	12%	19%
Ingresos Anuales	\$ 17.991.503	\$ 23.486.178	\$ 24.640.308
Costos Anuales	\$ 20.361.130	\$ 22.286.662	\$ 22.765.714
Flujo Anual	\$ 2.316.257	\$ 1.422.653	\$ 2.097.731
VAN	\$ 12.960.779,58	\$ 6.044.639,04	\$ 11.269.475,01
TIR	42%	26%	38%

Residuos Sobrantes (kg)	230	828	1.288
Energía (kcal/día)	6,51	9,31	14,18
Venta Energía	\$ 1.506.944	\$ 2.155.093	\$ 3.282.407
Ingresos	\$ 2.092.035	\$ 14.091.707	\$ 34.496.431
Costos	\$ 2.367.573	\$ 13.371.997	\$ 31.872.000

Flujo	\$ 9.295.629	\$ 24.995.224	\$ 40.030.746
-------	--------------	---------------	---------------

Fuente: (Elaboración Propia)

Cabe destacar que dentro de la proyección no se tomó en cuenta la venta del digestato, ya que no existe un mercado establecido para él. Los productores lecheros suelen ocupar sus propios residuos como fertilizantes. Sin embargo, las cualidades resultantes en el experimento favorecen bastante su posible comercialización, sobre todo los ensayos con más bacterias, que bajaron más la DQO que los ensayos sin bacterias. Por tanto, a pesar de que se produce más digestato en los ensayos sin bacterias, la diferencia en la DQO hace que los

digestatos resultantes de los ensayos con bacterias y a 37°C tengan mejores cualidades y genere menos olor.

Se puede observar el flujo luego de la venta de energía y las que tienen más retorno son los ensayos a los cuales se les adhirió bacterias. Por tanto se justifica el gasto asociado a la compra de éstas, ya que se genera más energía con menos residuos.

Las iniciativas que se pueden formar a partir de la energía y el digestato sobrante son variadas, en este estudio no se trabajará con ninguna de ellas, pero se deja a discusión la posibilidad. El proyecto genera energía suficiente para reemplazar la leña como combustible de un hogar promedio y quedaría un excedente el cual se podría comercializar como se ve en las Tablas 39 y 40 y bajar aún más las emisiones generadas por la leña en otros hogares de la comuna. Lo mismo en el caso del digestato.

### **3.7. Análisis Ambiental**

#### **3.7.1. Reducción de Gases de Efecto Invernadero (GEI)**

Se calcularon las posibles reducciones de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) asociados al reemplazo de la leña como combustible y las emisiones por gestión de estiércol.

##### **a) Emisiones por uso de leña como combustible para calefacción**

Se emplearan los siguientes factores de emisión según los datos que se muestran en el Anexo 2.

Tabla 41: Factores de emisión para combustión de Leña (kg de GEI/TJ)

Factores de emisión para combustión de Leña		
CO <sub>2</sub>	Factor de emisión estándar	112.000
	Rango Bajo	95.000
	Rango Alto	132.000
CH <sub>4</sub>	Factor de emisión estándar	30
	Rango Bajo	10
	Rango Alto	100,0
N <sub>2</sub> O	Factor de emisión estándar	4,0
	Rango Bajo	1,5
	Rango Alto	15,0

Fuente: (IPCC, 2006)

Lo primero es hacer las conversiones de unidades, si tenemos un consumo diario de 53.489,4 (kcal/día) al año serían 19.523.631 kcal. Como 1 Terajulio (TJ) corresponde a 239.000.000 kcal, entonces:

$$1,952 \cdot 10^7 \left[ \frac{kcal}{año} \right] = 8,168 \cdot 10^{-2} \left[ \frac{TJ}{año} \right]$$

Usando la Ecuación 13 para cada gas se obtiene lo siguiente:

$$E_{CO_2} = 8,168 \cdot 10^{-2} [TJ] \cdot 112.000 \left[ \frac{kg CO_2}{TJ} \right]$$

$$E_{CO_2} = 9,149 \cdot 10^3 [kg CO_2]$$

$$E_{CH_4} = 8,168 \cdot 10^{-2} [TJ] \cdot 30 \left[ \frac{kg CH_4}{TJ} \right]$$

$$E_{CH_4} = 2,450 [kg CH_4]$$

$$E_{CH_4} = 1,167 \cdot 10^{-1} [kg CO_2e]$$

$$E_{N_2O} = 8,168 \cdot 10^{-2} [TJ] \cdot 4,0 \left[ \frac{kg N_2O}{TJ} \right]$$

$$E_{N_2O} = 3,267 \cdot 10^{-1} [kg N_2O]$$

$$E_{N_2O} = 1,054 \cdot 10^{-3} [kg CO_2e]$$

Por tanto, las emisiones al año por uso de la leña como combustible son:

$$E = 9,149 \cdot 10^3 [kg CO_2] + 1,166 \cdot 10^{-1} [kg CO_2e] + 1,054 \cdot 10^{-3} [kg CO_2e]$$

$$E = 9,149 \cdot 10^3 [kg CO_2e]$$

Por otro lado se tiene las emisiones de CH<sub>4</sub> que se genera por la gestión del estiércol. Se ocupará la Ecuación 15 para la estimación de este valor, considerando que la temperatura media anual en la zona donde está ubicado el Fundo es de 11,4°C.

$$CH_{4_{Estiercol}} = \sum_{(T)} \left( \frac{EF_{(T)} \cdot N_{(T)}}{10^6} \right)$$

$$E_{CH_4} = \frac{23 \left[ \frac{kg CH_4}{cabeza \cdot año} \right] \cdot 48 [cabezas]}{10^6}$$

$$E_{CH_4} = 1,104 \cdot 10^{-4} \left[ \frac{kg CH_4}{año} \right]$$

$$E_{CH_4} = 5,257 \cdot 10^{-5} [kg CO_2e]$$

Como se puede apreciar las emisiones de metano por gestión de estiércol al año son de  $5,257 \cdot 10^{-5}$  (kgCO<sub>2</sub>e), un valor bastante bajo. Esto es principalmente por las bajas temperaturas del sector, ya que la digestión anaerobia requiere de mayores temperaturas para producir mayores cantidades de metano.

Ahora bien, usando los factores de emisión correspondiente a la combustión de biogás de acuerdo a los datos obtenidos del IPCC se hará una estimación de las

emisiones luego de hacer el reemplazo de la leña como combustible para cada arreglo<sup>13</sup>.

Tabla 42: Emisiones generadas por el uso de biogás en reemplazo de la leña

Ensayos	37°C		
	Sin Bacterias	0,05 ml de Bacterias	0,1 ml de Bacterias
Generación de Energía (kcal/día)	51.564,70	51.094,28	53.064,56
Generación de Energía (TJ/año)	0,078749	0,078031	0,08104
Ecuación 2 CO <sub>2</sub> (kgCO <sub>2</sub> )	4.299,72	4.260,49	4.424,79
Ecuación 2 CH <sub>4</sub> (kgCO <sub>2e</sub> )	0,078749	0,078031	0,08104
Ecuación 2 N <sub>2</sub> O(kgCO <sub>2e</sub> )	0,0078749	0,0078031	0,008104
Emisiones al Año (kgCO <sub>2e</sub> )	4.299,81	4.260,58	4.424,87

Fuente: (Elaboración Propia)

---

<sup>13</sup>Considerando sólo el biogás necesario para reemplazar la leña.

Tabla 43: Emisiones generadas por el uso de biogás en reemplazo de la leña

Ensayos	Temperatura Ambiente		
	Sin Bacterias	0,05 ml de Bacterias	0,1 ml de Bacterias
Generación de Energía (kcal/día)	51.549,87	51.497,36	52.218,46
Generación de Energía (TJ/año)	0,078727	0,078647	0,079748
Ecuación 2 CO <sub>2</sub> (kgCO <sub>2</sub> )	4.298,48	4.294,10	4.354,23
Ecuación 2 CH <sub>4</sub> (kgCO <sub>2e</sub> )	0,078727	0,078647	0,079748
Ecuación 2 N <sub>2</sub> O(kgCO <sub>2e</sub> )	0,0078727	0,0078647	0,0079748
Emisiones al Año (kgCO <sub>2e</sub> )	4.298,57	4.294,19	4.354,32

Fuente: (Elaboración Propia)

En la Tabla 44 se puede ver cuántas emisiones se reduce usando biogás. Las emisiones por el uso de biogás corresponden casi a un 50% menos que las que se genera quemando leña. Por lo que la alternativa se ve bastante atractiva tomando en cuenta el beneficio económico y ambiental que sugiere el reemplazo. Con la energía generada en los ensayos se puede comercializar a otros hogares, con dos o tres que dejen de consumir leña para calefacción habría ahorros de casi 14.500 kgCO<sub>2e</sub> al año.

Tabla 44: Emisiones reducidas por reemplazo de leña al año (kgCO<sub>2e</sub>)

Ensayos		Línea Base		Situación Futura	Emisiones Reducidas (kgCO <sub>2e</sub> )
		Emisiones por uso de leña (kgCO <sub>2e</sub> )	Emisiones por gestión de estiércol(kgCO <sub>2e</sub> )	Emisiones por uso de biogás (kgCO <sub>2e</sub> )	
37°C	Sin Bacterias	9.149,27	0,00005257	4.299,81	4.849,46
	0,05 ml de Bacterias	9.149,27	0,00005257	4.260,58	4.888,69
	0,1 ml de Bacterias	9.149,27	0,00005257	4.424,87	4.724,39
Temperatura Ambiente	Sin Bacterias	9.149,27	0,00005257	4.298,57	4.850,70
	0,05 ml de Bacterias	9.149,27	0,00005257	4.294,19	4.855,08
	0,1 ml de Bacterias	9.149,27	0,00005257	4.354,32	4.794,95

Fuente: (Elaboración Propia)

## **CONCLUSIONES**

Los combustibles derivados de la madera son la fuente de energía más antigua de la humanidad y aún en la actualidad sigue siendo ampliamente utilizado por la población a pesar de los problemas ambientales que conlleva su uso. Los problemas energéticos y de contaminación del país hace necesario incursionar en nuevas tecnologías que permitan usar fuentes renovables, buscando terminar así con la dependencia energética. Las energías renovables han tenido gran aceptación, puede observarse este hecho en el aumento de la generación proveniente de fuentes renovables mostrado en el reporte CIFES de julio de 2016. La promoción de este tipo de energía significa una reducción de la vulnerabilidad y mejoramiento de la calidad de los servicios energéticos; reducción de los impactos ambientales locales asociados a la producción y uso de la energía y el avance en el cumplimiento de la Agenda de Energía Nacional.

Como se mostró en el estudio, la leña es el combustible más utilizado para calefacción y también uno de los que trae mayores problemas ambientales. Se ven casos puntuales como Osorno que está dentro de la lista de ciudades más contaminadas del país. Este año, saliendo el Plan de Descontaminación, se vuelve necesario buscar alternativas que permitan reemplazar la leña sin bajar el nivel de confort de la población. Es por esta razón que el proyecto aparece como una alternativa viable que permite reemplazar este combustible.

Los Lagos es la Región que más existencia de ganado bovino tiene en Chile, con 749.600 cabezas sólo en explotaciones grandes. Osorno aporta con 440.364 cabezas, esto es aproximadamente 13.889.240 kg de estiércol en la comuna. El Proyecto no ocupa ni un 1% del residuo que se genera en la comuna, además la producción de biogás en los tratamientos evaluados permite suplir completamente la demanda energética residencial promedio en la Región. Incluso los ensayos que obtuvieron menores resultados fueron capaces de

solventar la demanda energética para calefacción con sólo una parte de la energía que se puede generar.

Desde un punto de vista técnico del Proyecto, la utilización de bacterias facultativas mejoró el rendimiento de metano, y también la remoción de materia orgánica y de sólidos. Disminuyendo la DQO de un 13.872 (mgO<sub>2</sub>/L) a 4.349 (mgO<sub>2</sub>/L), 4.056 (mgO<sub>2</sub>/L) y 3.336 (mgO<sub>2</sub>/L) los ensayos a 37°C sin bacterias, con 0,05 ml y 0,1 ml de bacterias, respectivamente. Y con menos eficiencia los ensayos a temperatura ambiente disminuyendo la DQO a 7.816 (mgO<sub>2</sub>/L), 6.376 (mgO<sub>2</sub>/L) y 4.616 (mgO<sub>2</sub>/L), los ensayos sin bacterias, con 0,05 ml y 0,1 ml de bacterias, respectivamente. Se ve el mismo comportamiento en la remoción de los sólidos totales y disueltos, los ensayos a 37°C lograron mayor remoción que los ensayos a temperatura ambiente, y su vez los ensayos con más bacterias mostraron mejores resultados. Así, los ensayos que más remoción tuvieron fueron los que tenían 0,1 ml de bacterias, bajando de 29,41% de sólidos totales a un 10,30% y un 11,72% los ensayos a 37°C y temperatura ambiente respectivamente.

El resultado de mezcla más eficiente correspondió al arreglo con 0,1 ml de bacterias a 37°C. En general los ensayos con adicción de temperatura tuvieron una alta producción durante todo el experimento, mientras que los que se mantuvieron a temperatura ambiente mostraron incremento en su producción a la segunda semana de haber empezado. Por otro lado los ensayos con bacterias mostraron significativas mejoras, tanto en producción de biogás como también en la disminución de los parámetros físico-químicos, que se reflejan en buenas condiciones para la posible comercialización del digestato (disminución de malos olores). En orden de mayor a menor producción encontramos el ensayo con 0,1 ml de bacterias a 37°C, el ensayo con 0,05 ml de bacterias a 37°C, el ensayo con 0,1 ml de bacterias a temperatura ambiente, el ensayo sin bacterias a 37°C, el

ensayo con 0,05 ml a temperatura ambiente y el ensayo si bacterias a temperatura ambiente, con 398,6 ml, 383,6 ml, 371,6 ml, 332,0 ml, 240,1 ml y 170,0 ml, respectivamente.

La efectividad de las bacterias se evidencia en los ensayos a temperatura ambiente. El que no contenía bacterias fue el que menos generó metano, mientras que el que tenía 0,1 ml y estaba en igualdad de condiciones logró generar 39,6 ml más que el ensayo sin bacterias que se mantuvo a 37°C.

Está claro que un tratamiento que requiere altas temperaturas implica un mayor requerimiento energético, y con esto, una mayor inversión, pero las posibles ganancias observadas con la venta de digestato hacen que sea un proyecto completamente rentable, en todos los casos la inversión es recuperada entre 2 a 3 años y el TIR no bajó del 25%, llegando incluso a 42% en el caso de los ensayos sin bacterias a temperatura ambiente. Se justifica completamente el gasto asociado al uso de bacterias y al aumento de temperatura, pues con la energía que se produce es posible generar aún más beneficios económicos. Los ensayos sin bacterias y a temperatura ambiente, si bien pudieron generar las ganancias suficientes como para hacer rentable el proyecto, ocuparon más residuos, lo que se traduce en menos energía sobrante. En los ensayos con 0,1 ml de bacterias se generó energía para reemplazar la leña como combustible con menos residuos que los ensayos sin bacterias, sobrando 1.380 y 1.288 kg en los ensayos a 37°C y temperatura ambiente, respectivamente. Mientras que en el ensayo sin bacterias y a temperatura ambiente solo quedaron 230 kg.

En cuanto al análisis ambiental, el tratamiento mostró un favorable escenario. Se bajaron los niveles de DQO (incluso en los ensayos sin bacterias) y así disminuyeron los olores generados por el purín puro. En cuanto a las emisiones atmosféricas se evidenció una baja considerable de kgCO<sub>2</sub>e reemplazando la

leña como combustible reduciendo 4.849,46 kgCO<sub>2e</sub>, 4.888,69 kgCO<sub>2e</sub> y 4.724,39 kgCO<sub>2e</sub>, los ensayos sin bacterias, con 0,05 ml y 0,1 ml de bacterias, respectivamente, en el caso del digester a 37°C. Y 4.850,08 kgCO<sub>2e</sub>, 4.855,08 kgCO<sub>2e</sub> y 4.794,95 kgCO<sub>2e</sub> los ensayos sin bacterias, con 0,05 ml y 0,1 ml de bacterias, respectivamente, en el caso del digester a temperatura ambiente.

Si se ocupara un 50% de los residuos que existen en la comuna de Osorno y el arreglo de 0,1 ml de bacterias a 37°C, se generaría 73.394 m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/día, equivalente a 649.103.386 kcal/día. Esta cantidad de energía da reemplazo a la leña en 12.892 hogares en la comuna, suponiendo las condiciones que se presentaron en el estudio, reduciendo así 60.906.009 kgCO<sub>2e</sub>. Por tanto, se puede concluir que el uso de biogás es una buena alternativa para bajar las emisiones respecto a la quema de leña y al mal manejo de los purines.

## **RECOMENDACIONES**

En el contexto de diseño de planta piloto y en la producción de biogás, se recomienda seguir con una investigación más exhaustiva con respecto a la co-digestión con desechos orgánicos de cocina, pues la proporción 1:1 requiere cantidades diarias considerables, que están por sobre los 800 kg/día. Difíciles de conseguir diariamente para acondicionar a los purines bovinos que entran al biodigestor.

Por otro lado, la cantidad de energía que puede producirse en el Fundo supera la necesaria para dar reemplazo a la leña como método de calefacción. En el análisis económico se pudo observar que los ensayos con más bacterias generaban más energía con menos residuos, por tanto el beneficio de su posible comercialización era mayor. Sería interesante saber cuál sería el beneficio real al usar esta energía, ya sea en procesos internos o como venta a otros hogares, en términos económicos, y ambientales al reemplazar otros combustibles.

En el estudio también se calculó cuánto digestato era necesario vender para que sea rentable el proyecto y pudiera solventar los gastos diarios utilizados para calefacción y el uso de bacterias. En ninguno de los casos supero el 50%, al contrario, se mostraron bajos en todos los ensayos, salvo los que necesitaban más bacterias y estaban a 37°C, ya que requieren de mayores gastos. Sería favorable conocer el mercado real que podría crearse a partir de este subproducto. Es necesario contribuir a cambiar el concepto según el cual los desechos y residuos orgánicos son una carga que debe ser eliminada y promover una concepción que considere estos subproductos como un recurso que puede ser aprovechado en la agricultura.

Los aportes de esta tecnología en los sistemas agrícolas son variados, pero requieren investigación concreta sobre los beneficios económicos que traen.

Crear nuevos mercados que sean viables económicamente y favorables con el medio ambiente. Promover el uso del digestato terminará en parte con la dependencia de fertilizantes químicos y el uso de biogás como método de calefacción disminuirá las emisiones asociadas al uso de leña.

## BIBLIOGRAFÍA

- Acosta, N. (2011). *Diseño, Construcción y Operación de un Digestor Piloto para Tratamiento de Residuos Orgánicos del Zoológico de Quito*. Ecuador: ESPE.
- Angelidaki, I., & Ahring, B. (1997). *Anaerobic digestion in Denmark. Past, present and future*. III curso de Ingeniería Ambiental, Flotats X. Universidad de Lleida.
- Angelidaki, I., Alves, M., Bolzonella, D., & Campos, J. (2009). *Defining the biomethane potencial (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays*. Water Science & Technology.
- Callaghan, F., Wase, D., Thayanithy, K., & Forster, C. (1999). *Co-digestion of waste organic solids: batch studies*. Bioresource Technology.
- Cendales Ladino, E. D. (2011). *Producción de biogás mediante la codigestión anaeróbica de la mezcla de residuos cítricos y estiércol bovino para su utilización como fuente de energía renovable*. Bogotá, D.C., Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Centro para la Innovación y Fomento de las Energías Sustentables (CIFES). (2016). *Reporte CIFES: Energías Renovables en el Mercado Eléctrico Chileno, Junio 2016*. Santiago, Chile.
- Comisión Nacional de Energía (CNE). (2014). *Balance Nacional de Energía 2013*. Santiago, Chile. Obtenido de Energía Abierta.
- Comisión Nacional de Energía. (2015). *Reporte Mensual Sector Energético, Diciembre 2015*. Santiago, Chile.
- Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA). (2010). *Complementos y actualización del inventario de Gases de Efecto Invernadero (GEI) para Chile en los sectores de agricultura, uso del suelo, cambio de uso del suelo y silvicultura y residuos antrópicos*. Santiago, Chile: Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA).

- Coombs, J. (1990). The present and future of anaerobic digestion. En whatley, A, Ed. Anaerobic Digestion: a Waste Treatment Techology. *Critical Reports in Applied Chemistry, Volumen 31*, 1-42.
- Corporación del Desarrollo Tecnológico, CDT. (Diciembre, 2015). *Medición del Consumo Nacional de Leña y Otros Combustibles Sólidos Derivados de la Madera*. Santiago, Chile.
- Dar, G., & Tandon, S. (1987). *Biogas production from pretreated wheat straw, lanta residue, apple and peach leaf litter with cattle dung*. Biological Wastes.
- El Martutino. (21 de Diciembre de 2014). *El Martutino*. Obtenido de Entrevista al Seremi de Energía: <http://www.elmartutino.cl/noticia/sociedad/entrevista-al-seremi-de-energia-los-desafios-energeticos-de-la-region-de-valparaiso>
- Field , J., Sierra-Alvarez, R., & Lettinga, G. (1988). Esayos anaerobios. *Actas 4to Seminario Depuración Anaerobia de Aguas Residuales*. Valladolid 23-26 Diciembre.
- Flores, J. P., Martinez, E., Espinosa, M., Avendaño, P., Isaac, A., Torres, P., & Henriquez, G. (2010). *Determinación de la erosión actual potencial de los suelos de Chile: Región de Valparaíso. Síntesis de Resultados*. Santiago, Chile: CIREN.
- Flotats, X., Campos, E., & Bonmatí, A. (1997). *Aprovechamiento energético de residuos ganaderos*. Departamento de Medio Ambiente y Ciencias del Suelo, Universidad de Lleida.
- Gavala, H., Skiadas, I., Bozinis, N., & Lyberatos, G. (1996). *Anaerobic codigestion of agricultural industries wastewaters*. Water Science and Technology.
- Gomez-Lobo, A., Lima, J., Hill, C., & Meneses, M. (2006). *Diagnóstico del Mercado de la Leña en Chile. Informe Final*. Santiago, Chile: Departamento de Economía, Universidad de Chile.

- Hilper, R., Winter, J., & Kandler, O. (1982). *Feed additives and disinfectants as inhibitory factors in anaerobic digestion of agricultural wastes*. Berlin: Conference Energy from Biomass.
- International Energy Agency, IEA. (2015). *World Energy Outlook 2014*.
- International Energy Agency, IEA. (2015). *Key World Energy Statistics*.
- Ley 19.940. (13 de Marzo de 2004). *Diario Oficial de la República de Chile*. Santiago, Chile.
- Ley 20.257. (1 de Abril de 2008). *Diario Oficial de la República de Chile*. Santiago, Chile.
- Ley 20.698. (22 de Octubre de 2013). *Diario Oficial de la República de Chile*. Santiago, Chile.
- Martínez, C. (julio-septiembre de 2007). *Volumen de biodigestores*. Obtenido de Energía y tú (número 39): <http://www.cubasolar.cu/>
- Neumann Carmire, E., & Vélis Miranda, H. (2012). *Encuesta Ganado Bovino, Año 2011*. Santiago, Chile: Instituto Nacional de Estadística (INE), Departamento de Estadísticas Agrarias, Departamento de Comunicaciones e Imagen Corporativa.
- Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). (2015). *Boletín de Insumos*. Santiago, Chile.
- Ramírez, V. (2007). *Formulación y Evaluación de Proyectos de Inversión*. Santiago, Chile: Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes.
- Raposo, F., De la Rubia, M., Fernández-Cegri, V., & Borja, R. (2011). *Anaerobic digestion of solid organic substrates in batch mode: an overview relating to methane yields and experimental procedures*. Renewable and Sustainable Energy Reviews.
- Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, REN21. (2015). *Renewables 2015 Global Status Report*.
- Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, REN21. (2016). *Renewables 2014 Global Status Report*.

- Ripley, L., Boyle, W., & Converse, J. (1986). *Improved alkalimetric monitoring for anaerobic digestion of high strength wastes*. J. WPCF 58(5).
- Schmidt, J., Angelidaki, I., & Ahring, B. (1999). *Anaerobic digestion of olive mill effluents together with different wastes*. Barcelona: Proceeding of the II International Symposium on anaerobic digestion of solid waste.
- SEREMI Región de Los Lagos, Ministerio de Medio Ambiente. (Abril de 2016). *Plan Descontaminación Atmosférica para Osorno*. Obtenido de PDAO: <http://www.pdao.cl/>
- SERNAC, & SEREMI del Medio Ambiente. (2016). *Reporte de Comercio Formal de Leña Seca y Pellets. Mes de Mayo de 2016*. Chile.
- Sistema Nacional de Certificación de Leña. (Agosto de 2015). [www.lena.cl](http://www.lena.cl). Obtenido de [http://lena.cl/wp-content/uploads/2015/08/formulario\\_4.pdf](http://lena.cl/wp-content/uploads/2015/08/formulario_4.pdf)
- Soto, M. B. (2014). *Ensayo de Potencial Metanogénico de la Biomasa*. Valparaíso: Facultad de Ingeniería. Universidad de Playa Ancha.
- Tchobanoglous, G., Theisen, H., & Vigil, S. (1993). *Integrated solid waste management*. MacGraw-Hill.
- Trujillo, D., Pérez, J., & Cebberos, F. (1993). *Energy recovery from wastes. Anaerobic digestion of tomato plant mixed with rabbit wastes*. Bioresource Technology.
- Universidad de Chile para Comisión Nacional de Medioambiente. (2009). *Consumo de Energía y Emisiones de Gases de Efecto Invernadero en Chile 2007-2030*. Santiago, Chile.
- Varnero, M., & Arellano, J. (1991). *Aprovechamiento racional de desechos orgánicos*. Santiago, Chile: Ministerio de Agricultura (FIA). Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales.

## ANEXO 1: Flujos de Caja

### 1. Arreglo Sin Bacterias a 37°C

A continuación se muestran los ingresos y costos asociados al arreglo.

A-Tabla 1: Ingresos y Costos Arreglo Sin Bacterias a 37°C

Ingresos	Unidad	Cantidad	Precio	Total
Venta Digestato	kg/año	305.870	\$ 468	\$ 24.179.024
Ahorro por reemplazo de combustible	m <sup>3</sup> /año	13	\$ 1.068	\$ 390.000
TOTAL				\$ 24.569.024

Costos Fijos	Unidad	Cantidad	Precio	Total
Agitación	kW/día	5,6	\$ 145	\$ 296.380
Diésel	L	3	\$ 650	\$ 711.750
Calefacción	kW/día	17	\$ 145	\$ 21.593.400
Costos Mantención				\$ 300.000
TOTAL				\$ 22.901.530

Inversión Inicial				
	Costos en Construcción			\$ 4.462.747
	Capital de trabajo			\$ 1.000.000
	TOTAL			\$ 5.462.747

Fuente: (Elaboración Propia)

Los indicadores económicos se calcularon en base al flujo a 19 años.

VAN = \$9.666.599,28

TIR = 35%

TRI = 0,144

A continuación se muestra el flujo de caja sin considerar el flujo de fuentes y usos de fondos. Así es posible tener una primera aproximación en el análisis de factibilidad económica.

A-Tabla 2: Flujo de Caja Arreglo Sin Bacterias a 37°C

	0	1	2	3	4
Venta Fertilizante		\$ 24.179.024	\$ 24.179.024	\$ 24.179.024	\$ 24.179.024
Ahorro por uso de biogás		\$ 390.000	\$ 390.000	\$ 390.000	\$ 390.000
Total Ingresos		\$ 24.569.024	\$ 24.569.024	\$ 24.569.024	\$ 24.569.024
Costos Fijos		\$ 22.901.530	\$ 22.901.530	\$ 22.901.530	\$ 22.901.530
Costo Bacterias		-	-	-	-
Costos Totales		\$ 22.901.530	\$ 22.901.530	\$ 22.901.530	\$ 22.901.530
Depreciación		\$ 223.137	\$ 223.137	\$ 223.137	\$ 223.137
Inversión	\$ 5.462.747				
Flujo de Caja	\$ 5.462.747	\$ 1.890.631	\$ 1.890.631	\$ 1.890.631	\$ 1.890.631

	5	6	7	8	9
Venta Fertilizante	\$ 24.179.024	\$ 24.179.024	\$ 24.179.024	\$ 24.179.024	\$ 24.179.024
Ahorro por uso de biogás	\$ 390.000	\$ 390.000	\$ 390.000	\$ 390.000	\$ 390.000
Total Ingresos	\$ 24.569.024	\$ 24.569.024	\$ 24.569.024	\$ 24.569.024	\$ 24.569.024
Costos Fijos	\$ 22.901.530	\$ 22.901.530	\$ 22.901.530	\$ 22.901.530	\$ 22.901.530
Costo Bacterias	-	-	-	-	-
Costos Totales	\$ 22.901.530	\$ 22.901.530	\$ 22.901.530	\$ 22.901.530	\$ 22.901.530
Depreciación	\$ 223.137	\$ 223.137	\$ 223.137	\$ 223.137	\$ 223.137
Inversión					
Flujo de Caja	\$ 1.890.631	\$ 1.890.631	\$ 1.890.631	\$ 1.890.631	\$ 1.890.631

Fuente: (Elaboración Propia)

	10	11	12	13	14
Venta Fertilizante	\$ 24.179.024	\$ 24.179.024	\$ 24.179.024	\$ 24.179.024	\$ 24.179.024
Ahorro por uso de biogás	\$ 390.000	\$ 390.000	\$ 390.000	\$ 390.000	\$ 390.000
Total Ingresos	\$ 24.569.024	\$ 24.569.024	\$ 24.569.024	\$ 24.569.024	\$ 24.569.024
Costos Fijos	\$ 22.901.530	\$ 22.901.530	\$ 22.901.530	\$ 22.901.530	\$ 22.901.530
Costo Bacterias	-	-	-	-	-
Costos Totales	\$ 22.901.530	\$ 22.901.530	\$ 22.901.530	\$ 22.901.530	\$ 22.901.530
Depreciación	\$ 223.137	\$ 223.137	\$ 223.137	\$ 223.137	\$ 223.137
Inversión					
Flujo de Caja	\$ 1.890.631	\$ 1.890.631	\$ 1.890.631	\$ 1.890.631	\$ 1.890.631

	15	16	17	18	19
Venta Fertilizante	\$ 24.179.024	\$ 24.179.024	\$ 24.179.024	\$ 24.179.024	\$ 24.179.024
Ahorro por uso de biogás	\$ 390.000	\$ 390.000	\$ 390.000	\$ 390.000	\$ 390.000
Total Ingresos	\$ 24.569.024	\$ 24.569.024	\$ 24.569.024	\$ 24.569.024	\$ 24.569.024
Costos Fijos	\$ 22.901.530	\$ 22.901.530	\$ 22.901.530	\$ 22.901.530	\$ 22.901.530
Costo Bacterias	-	-	-	-	-
Costos Totales	\$ 22.901.530	\$ 22.901.530	\$ 22.901.530	\$ 22.901.530	\$ 22.901.530
Depreciación	\$ 223.137	\$ 223.137	\$ 223.137	\$ 223.137	\$ 223.137
Inversión					
Flujo de Caja	\$ 1.890.631	\$ 1.890.631	\$ 1.890.631	\$ 1.890.631	\$ 1.890.631

Fuente: (Elaboración Propia)

## 2. Arreglo con 0,05 ml de Bacterias a 37°C

A continuación se muestran los ingresos y costos asociados al arreglo.

A-Tabla 3: Ingresos y Costos Arreglo 0,05 ml Bacterias a 37°C

Ingresos	Unidad	Cantidad	Precio	Total
Venta Digestato	kg/año	292.000	\$ 468	\$25.798.200
Ahorro por reemplazo de combustible	m <sup>3</sup> /año	13	\$ 1.068	\$390.000
TOTAL				\$26.188.200

Costos Fijos	Unidad	Cantidad	Precio	Total
Agitación	kW/día	5,6	\$ 145	\$ 296.380
Diésel	L	3	\$ 650	\$ 711.750
Calefacción	kW/día	17	\$ 145	\$ 21.593.400
Costos Mantención				\$ 300.000
TOTAL				\$ 22.901.530

Inversión Inicial		
Costos en Construcción		\$ 4.462.747
Capital de trabajo		\$ 1.000.000
TOTAL		\$ 5.462.747

Fuente: (Elaboración Propia)

Los indicadores económicos se calcularon en base al flujo a 19 años.

VAN = \$12.551.803,46

TIR = 41%

TRI = 0,121

A continuación se muestra el flujo de caja sin considerar el flujo de fuentes y usos de fondos. Así es posible tener una primera aproximación en el análisis de factibilidad económica.

A-Tabla 4: Flujo de Caja Arreglo 0,05 ml Bacterias a 37°C

	0	1	2	3	4
Venta Fertilizante		\$25.798.200	\$25.798.200	\$25.798.200	\$25.798.200
Ahorro por uso de biogás		\$ 390.000	\$ 390.000	\$ 390.000	\$ 390.000
Total Ingresos		\$26.188.200	\$26.188.200	\$26.188.200	\$26.188.200
Costos Fijos		\$ 22.901.530	\$ 22.901.530	\$ 22.901.530	\$ 22.901.530
Costo Bacterias		\$ 1.246.392	\$ 1.246.392	\$ 1.246.392	\$ 1.246.392
Costos Totales		\$ 24.147.922	\$ 24.147.922	\$ 24.147.922	\$ 24.147.922
Depreciación		\$ 223.137	\$ 223.137	\$ 223.137	\$ 223.137
Inversión	\$ 5.462.747				
Flujo de Caja	\$ 5.462.747	\$2.263.415	\$2.263.415	\$2.263.415	\$2.263.415

	5	6	7	8	9
Venta Fertilizante	\$25.798.200	\$25.798.200	\$25.798.200	\$25.798.200	\$25.798.200
Ahorro por uso de biogás	\$ 390.000	\$ 390.000	\$ 390.000	\$ 390.000	\$ 390.000
Total Ingresos	\$26.188.200	\$26.188.200	\$26.188.200	\$26.188.200	\$26.188.200
Costos Fijos	\$ 22.901.530	\$ 22.901.530	\$ 22.901.530	\$ 22.901.530	\$ 22.901.530
Costo Bacterias	\$ 1.246.392	\$ 1.246.392	\$ 1.246.392	\$ 1.246.392	\$ 1.246.392
Costos Totales	\$ 24.147.922	\$ 24.147.922	\$ 24.147.922	\$ 24.147.922	\$ 24.147.922
Depreciación	\$ 223.137	\$ 223.137	\$ 223.137	\$ 223.137	\$ 223.137
Inversión					
Flujo de Caja	\$2.263.415	\$2.263.415	\$2.263.415	\$2.263.415	\$2.263.415

Fuente: (Elaboración Propia)

	10	11	12	13	14
Venta Fertilizante	\$25.798.200	\$25.798.200	\$25.798.200	\$25.798.200	\$25.798.200
Ahorro por uso de biogás	\$ 390.000	\$ 390.000	\$ 390.000	\$ 390.000	\$ 390.000
Total Ingresos	\$26.188.200	\$26.188.200	\$26.188.200	\$26.188.200	\$26.188.200
Costos Fijos	\$ 22.901.530	\$ 22.901.530	\$ 22.901.530	\$ 22.901.530	\$ 22.901.530
Costo Bacterias	\$ 1.246.392	\$ 1.246.392	\$ 1.246.392	\$ 1.246.392	\$ 1.246.392
Costos Totales	\$ 24.147.922	\$ 24.147.922	\$ 24.147.922	\$ 24.147.922	\$ 24.147.922
Depreciación	\$ 223.137	\$ 223.137	\$ 223.137	\$ 223.137	\$ 223.137
Inversión					
Flujo de Caja	\$2.263.415	\$2.263.415	\$2.263.415	\$2.263.415	\$2.263.415

	15	16	17	18	19
Venta Fertilizante	\$25.798.200	\$25.798.200	\$25.798.200	\$25.798.200	\$25.798.200
Ahorro por uso de biogás	\$ 390.000	\$ 390.000	\$ 390.000	\$ 390.000	\$ 390.000
Total Ingresos	\$26.188.200	\$26.188.200	\$26.188.200	\$26.188.200	\$26.188.200
Costos Fijos	\$ 22.901.530	\$ 22.901.530	\$ 22.901.530	\$ 22.901.530	\$ 22.901.530
Costo Bacterias	\$ 1.246.392	\$ 1.246.392	\$ 1.246.392	\$ 1.246.392	\$ 1.246.392
Costos Totales	\$ 24.147.922	\$ 24.147.922	\$ 24.147.922	\$ 24.147.922	\$ 24.147.922
Depreciación	\$ 223.137	\$ 223.137	\$ 223.137	\$ 223.137	\$ 223.137
Inversión					
Flujo de Caja	\$2.263.415	\$2.263.415	\$2.263.415	\$2.263.415	\$2.263.415

Fuente: (Elaboración Propia)

### 3. Arreglo con 0,1 ml de Bacterias a 37°C

A continuación se muestran los ingresos y costos asociados al arreglo.

A-Tabla 5: Ingresos y Costos Arreglo 0,1 ml Bacterias a 37°C

Ingresos	Unidad	Cantidad	Precio	Total
Venta Digestato	kg/año	248.565	\$ 468	\$26.584.027
Ahorro por reemplazo de combustible	m <sup>3</sup> /año	13	\$ 1.068	\$390.000
TOTAL				\$26.974.027

Costos Fijos	Unidad	Cantidad	Precio	Total
Agitación	kW/día	5,6	\$ 145	\$ 296.380
Diésel	L	3	\$ 650	\$ 711.750
Calefacción	kW/día	17	\$ 145	\$ 21.593.400
Costos Mantención				\$ 300.000
TOTAL				\$ 22.901.530

Inversión Inicial				
		Costos en Construcción		\$ 4.462.747
		Capital de trabajo		\$ 1.000.000
		TOTAL		\$ 5.462.747

Fuente: (Elaboración Propia)

Los indicadores económicos se calcularon en base al flujo a 19 años.

VAN = \$9.669.859,59

TIR = 35%

TRI = 0,144

A continuación se muestra el flujo de caja sin considerar el flujo de fuentes y usos de fondos. Así es posible tener una primera aproximación en el análisis de factibilidad económica.

A-Tabla 6: Flujo de Caja Arreglo 0,1 ml Bacterias a 37°C

	0	1	2	3	4
Venta Fertilizante		\$26.584.027	\$26.584.027	\$26.584.027	\$26.584.027
Ahorro por uso de biogás		\$ 390.000	\$ 390.000	\$ 390.000	\$ 390.000
Total Ingresos		\$26.974.027	\$26.974.027	\$26.974.027	\$26.974.027
Costos Fijos		\$ 22.901.530	\$ 22.901.530	\$ 22.901.530	\$ 22.901.530
Costo Bacterias		\$ 2.404.582	\$ 2.404.582	\$ 2.404.582	\$ 2.404.582
Costos Totales		\$ 25.306.112	\$ 25.306.112	\$ 25.306.112	\$ 25.306.112
Depreciación		\$ 223.137	\$ 223.137	\$ 223.137	\$ 223.137
Inversión	\$ 5.462.747				
Flujo de Caja	\$ 5.462.747	\$1.891.052	\$1.891.052	\$1.891.052	\$1.891.052

	5	6	7	8	9
Venta Fertilizante	\$26.584.027	\$26.584.027	\$26.584.027	\$26.584.027	\$26.584.027
Ahorro por uso de biogás	\$ 390.000	\$ 390.000	\$ 390.000	\$ 390.000	\$ 390.000
Total Ingresos	\$26.974.027	\$26.974.027	\$26.974.027	\$26.974.027	\$26.974.027
Costos Fijos	\$ 22.901.530	\$ 22.901.530	\$ 22.901.530	\$ 22.901.530	\$ 22.901.530
Costo Bacterias	\$ 2.404.582	\$ 2.404.582	\$ 2.404.582	\$ 2.404.582	\$ 2.404.582
Costos Totales	\$ 25.306.112	\$ 25.306.112	\$ 25.306.112	\$ 25.306.112	\$ 25.306.112
Depreciación	\$ 223.137	\$ 223.137	\$ 223.137	\$ 223.137	\$ 223.137
Inversión					
Flujo de Caja	\$1.891.052	\$1.891.052	\$1.891.052	\$1.891.052	\$1.891.052

Fuente: (Elaboración Propia)

	10	11	12	13	14
Venta Fertilizante	\$26.584.027	\$26.584.027	\$26.584.027	\$26.584.027	\$26.584.027
Ahorro por uso de biogás	\$ 390.000	\$ 390.000	\$ 390.000	\$ 390.000	\$ 390.000
Total Ingresos	\$26.974.027	\$26.974.027	\$26.974.027	\$26.974.027	\$26.974.027
Costos Fijos	\$ 22.901.530	\$ 22.901.530	\$ 22.901.530	\$ 22.901.530	\$ 22.901.530
Costo Bacterias	\$ 2.404.582	\$ 2.404.582	\$ 2.404.582	\$ 2.404.582	\$ 2.404.582
Costos Totales	\$ 25.306.112	\$ 25.306.112	\$ 25.306.112	\$ 25.306.112	\$ 25.306.112
Depreciación	\$ 223.137	\$ 223.137	\$ 223.137	\$ 223.137	\$ 223.137
Inversión					
Flujo de Caja	\$1.891.052	\$1.891.052	\$1.891.052	\$1.891.052	\$1.891.052

	15	16	17	18	19
Venta Fertilizante	\$26.584.027	\$26.584.027	\$26.584.027	\$26.584.027	\$26.584.027
Ahorro por uso de biogás	\$ 390.000	\$ 390.000	\$ 390.000	\$ 390.000	\$ 390.000
Total Ingresos	\$26.974.027	\$26.974.027	\$26.974.027	\$26.974.027	\$26.974.027
Costos Fijos	\$ 22.901.530	\$ 22.901.530	\$ 22.901.530	\$ 22.901.530	\$ 22.901.530
Costo Bacterias	\$ 2.404.582	\$ 2.404.582	\$ 2.404.582	\$ 2.404.582	\$ 2.404.582
Costos Totales	\$ 25.306.112	\$ 25.306.112	\$ 25.306.112	\$ 25.306.112	\$ 25.306.112
Depreciación	\$ 223.137	\$ 223.137	\$ 223.137	\$ 223.137	\$ 223.137
Inversión					
Flujo de Caja	\$1.891.052	\$1.891.052	\$1.891.052	\$1.891.052	\$1.891.052

Fuente: (Elaboración Propia)

#### 4. Arreglo Sin Bacterias a Temperatura Ambiente

A continuación se muestran los ingresos y costos asociados al arreglo.

A-Tabla 7: Ingresos y Costos Arreglo Sin Bacterias a 37°C

Ingresos	Unidad	Cantidad	Precio	Total
Venta Digestato	kg/año	593.125	\$ 468	\$22.064.250
Ahorro por reemplazo de combustible	m <sup>3</sup> /año	13	\$ 1.068	\$390.000
TOTAL				\$22.454.250

Costos Fijos	Unidad	Cantidad	Precio	Total
Agitación	kW/día	5,6	\$ 145	\$ 296.380
Diésel	L	3	\$ 650	\$ 711.750
Calefacción	kW/día	15	\$ 145	\$19.053.000
Costos Mantención				\$ 300.000
TOTAL				\$20.061.130

Inversión Inicial	
Costos en Construcción	\$ 4.462.747
Capital de trabajo	\$ 1.000.000
TOTAL	\$ 5.462.747

Fuente: (Elaboración Propia)

Los indicadores económicos se calcularon en base al flujo a 19 años.

VAN = \$12.960.779,58

TIR = 42%

TRI = 0,118

A continuación se muestra el flujo de caja sin considerar el flujo de fuentes y usos de fondos. Así es posible tener una primera aproximación en el análisis de factibilidad económica.

A-Tabla 8: Flujo de Caja Arreglo Sin Bacterias a Temperatura Ambiente

	0	1	2	3	4
Venta Fertilizante		\$22.064.250	\$22.064.250	\$22.064.250	\$22.064.250
Ahorro por uso de biogás		\$ 390.000	\$ 390.000	\$ 390.000	\$ 390.000
Total Ingresos		\$22.454.250	\$22.454.250	\$22.454.250	\$22.454.250
Costos Fijos		\$20.361.130	\$20.361.130	\$20.361.130	\$20.361.130
Costo Bacterias		-	-	-	-
Costos Totales		\$ 20.361.130	\$ 20.361.130	\$ 20.361.130	\$ 20.361.130
Depreciación		\$ 223.137	\$ 223.137	\$ 223.137	\$ 223.137
Inversión	\$ 5.462.747				
Flujo de Caja	\$ 5.462.747	\$2.316.257	\$2.316.257	\$2.316.257	\$2.316.257

	5	6	7	8	9
Venta Fertilizante	\$22.064.250	\$22.064.250	\$22.064.250	\$22.064.250	\$22.064.250
Ahorro por uso de biogás	\$ 390.000	\$ 390.000	\$ 390.000	\$ 390.000	\$ 390.000
Total Ingresos	\$22.454.250	\$22.454.250	\$22.454.250	\$22.454.250	\$22.454.250
Costos Fijos	\$20.361.130	\$20.361.130	\$20.361.130	\$20.361.130	\$20.361.130
Costo Bacterias	-	-	-	-	-
Costos Totales	\$ 20.361.130	\$ 20.361.130	\$ 20.361.130	\$ 20.361.130	\$ 20.361.130
Depreciación	\$ 223.137	\$ 223.137	\$ 223.137	\$ 223.137	\$ 223.137
Inversión					
Flujo de Caja	\$2.316.257	\$2.316.257	\$2.316.257	\$2.316.257	\$2.316.257

Fuente: (Elaboración Propia)

	10	11	12	13	14
Venta Fertilizante	\$22.064.250	\$22.064.250	\$22.064.250	\$22.064.250	\$22.064.250
Ahorro por uso de biogás	\$ 390.000	\$ 390.000	\$ 390.000	\$ 390.000	\$ 390.000
Total Ingresos	\$22.454.250	\$22.454.250	\$22.454.250	\$22.454.250	\$22.454.250
Costos Fijos	\$20.361.130	\$20.361.130	\$20.361.130	\$20.361.130	\$20.361.130
Costo Bacterias	-	-	-	-	-
Costos Totales	\$ 20.361.130	\$ 20.361.130	\$ 20.361.130	\$ 20.361.130	\$ 20.361.130
Depreciación	\$ 223.137	\$ 223.137	\$ 223.137	\$ 223.137	\$ 223.137
Inversión					
Flujo de Caja	\$2.316.257	\$2.316.257	\$2.316.257	\$2.316.257	\$2.316.257

	15	16	17	18	19
Venta Fertilizante	\$22.064.250	\$22.064.250	\$22.064.250	\$22.064.250	\$22.064.250
Ahorro por uso de biogás	\$ 390.000	\$ 390.000	\$ 390.000	\$ 390.000	\$ 390.000
Total Ingresos	\$22.454.250	\$22.454.250	\$22.454.250	\$22.454.250	\$22.454.250
Costos Fijos	\$20.361.130	\$20.361.130	\$20.361.130	\$20.361.130	\$20.361.130
Costo Bacterias	-	-	-	-	-
Costos Totales	\$ 20.361.130	\$ 20.361.130	\$ 20.361.130	\$ 20.361.130	\$ 20.361.130
Depreciación	\$ 223.137	\$ 223.137	\$ 223.137	\$ 223.137	\$ 223.137
Inversión					
Flujo de Caja	\$2.316.257	\$2.316.257	\$2.316.257	\$2.316.257	\$2.316.257

Fuente: (Elaboración Propia)

## 5. Arreglo 0,05 ml de Bacterias a Temperatura Ambiente

A continuación se muestran los ingresos y costos asociados al arreglo.

A-Tabla 9: Ingresos y Costos Arreglo 0,05 ml Bacterias a Temperatura Ambiente

Ingresos	Unidad	Cantidad	Precio	Total
Venta Digestato	kg/año	413.910	\$ 468	\$23.096.178
Ahorro por reemplazo de combustible	m <sup>3</sup> /año	13	\$ 1.068	\$390.000
TOTAL				\$23.486.178

Costos Fijos	Unidad	Cantidad	Precio	Total
Agitación	kW/día	5,6	\$ 145	\$ 296.380
Diésel	L	3	\$ 650	\$ 711.750
Calefacción	kW/día	15	\$ 145	\$19.053.000
Costos Mantención				\$ 300.000
TOTAL				\$20.061.130

Inversión Inicial		
	Costos en Construcción	\$ 4.462.747
	Capital de trabajo	\$ 1.000.000
	TOTAL	\$ 5.462.747

Fuente: (Elaboración Propia)

Los indicadores económicos se calcularon en base al flujo a 19 años.

VAN = \$6.044.639,04

TIR = 26%

TRI = 0,192

A continuación se muestra el flujo de caja sin considerar el flujo de fuentes y usos de fondos. Así es posible tener una primera aproximación en el análisis de factibilidad económica.

A-Tabla 10: Flujo de Caja Arreglo Sin Bacterias a Temperatura Ambiente

	0	1	2	3	4
Venta Fertilizante		\$23.096.178	\$23.096.178	\$23.096.178	\$23.096.178
Ahorro por uso de biogás		\$ 390.000	\$ 390.000	\$ 390.000	\$ 390.000
Total Ingresos		\$23.486.178	\$23.486.178	\$23.486.178	\$23.486.178
Costos Fijos		\$20.361.130	\$20.361.130	\$20.361.130	\$20.361.130
Costo Bacterias		\$1.925.532	\$1.925.532	\$1.925.532	\$1.925.532
Costos Totales		\$22.286.662	\$22.286.662	\$22.286.662	\$22.286.662
Depreciación		\$ 223.137	\$ 223.137	\$ 223.137	\$ 223.137
Inversión	\$ 5.462.747				
Flujo de Caja	\$ 5.462.747	\$1.422.653	\$1.422.653	\$1.422.653	\$1.422.653

	5	6	7	8	9
Venta Fertilizante	\$23.096.178	\$23.096.178	\$23.096.178	\$23.096.178	\$23.096.178
Ahorro por uso de biogás	\$ 390.000	\$ 390.000	\$ 390.000	\$ 390.000	\$ 390.000
Total Ingresos	\$23.486.178	\$23.486.178	\$23.486.178	\$23.486.178	\$23.486.178
Costos Fijos	\$20.361.130	\$20.361.130	\$20.361.130	\$20.361.130	\$20.361.130
Costo Bacterias	\$1.925.532	\$1.925.532	\$1.925.532	\$1.925.532	\$1.925.532
Costos Totales	\$22.286.662	\$22.286.662	\$22.286.662	\$22.286.662	\$22.286.662
Depreciación	\$ 223.137	\$ 223.137	\$ 223.137	\$ 223.137	\$ 223.137
Inversión					
Flujo de Caja	\$1.422.653	\$1.422.653	\$1.422.653	\$1.422.653	\$1.422.653

Fuente: (Elaboración Propia)

	10	11	12	13	14
Venta Fertilizante	\$23.096.178	\$23.096.178	\$23.096.178	\$23.096.178	\$23.096.178
Ahorro por uso de biogás	\$ 390.000	\$ 390.000	\$ 390.000	\$ 390.000	\$ 390.000
Total Ingresos	\$23.486.178	\$23.486.178	\$23.486.178	\$23.486.178	\$23.486.178
Costos Fijos	\$20.361.130	\$20.361.130	\$20.361.130	\$20.361.130	\$20.361.130
Costo Bacterias	\$1.925.532	\$1.925.532	\$1.925.532	\$1.925.532	\$1.925.532
Costos Totales	\$22.286.662	\$22.286.662	\$22.286.662	\$22.286.662	\$22.286.662
Depreciación	\$ 223.137	\$ 223.137	\$ 223.137	\$ 223.137	\$ 223.137
Inversión					
Flujo de Caja	\$1.422.653	\$1.422.653	\$1.422.653	\$1.422.653	\$1.422.653

	15	16	17	18	19
Venta Fertilizante	\$23.096.178	\$23.096.178	\$23.096.178	\$23.096.178	\$23.096.178
Ahorro por uso de biogás	\$ 390.000	\$ 390.000	\$ 390.000	\$ 390.000	\$ 390.000
Total Ingresos	\$23.486.178	\$23.486.178	\$23.486.178	\$23.486.178	\$23.486.178
Costos Fijos	\$20.361.130	\$20.361.130	\$20.361.130	\$20.361.130	\$20.361.130
Costo Bacterias	\$1.925.532	\$1.925.532	\$1.925.532	\$1.925.532	\$1.925.532
Costos Totales	\$22.286.662	\$22.286.662	\$22.286.662	\$22.286.662	\$22.286.662
Depreciación	\$ 223.137	\$ 223.137	\$ 223.137	\$ 223.137	\$ 223.137
Inversión					
Flujo de Caja	\$1.422.653	\$1.422.653	\$1.422.653	\$1.422.653	\$1.422.653

Fuente: (Elaboración Propia)

## 5. Arreglo 0,1 ml de Bacterias a Temperatura Ambiente

A continuación se muestran los ingresos y costos asociados al arreglo.

A-Tabla 11: Ingresos y Costos Arreglo 0,1 ml Bacterias a Temperatura Ambiente

Ingresos	Unidad	Cantidad	Precio	Total
Venta Digestato	kg/año	274.480	\$ 468	\$24.250.308
Ahorro por reemplazo de combustible	m <sup>3</sup> /año	13	\$ 1.068	\$390.000
TOTAL				\$24.640.308

Costos Fijos	Unidad	Cantidad	Precio	Total
Agitación	kW/día	5,6	\$ 145	\$ 296.380
Diésel	L	3	\$ 650	\$ 711.750
Calefacción	kW/día	15	\$ 145	\$19.053.000
Costos Mantención				\$ 300.000
TOTAL				\$20.061.130

Inversión Inicial		
	Costos en Construcción	\$ 4.462.747
	Capital de trabajo	\$ 1.000.000
	TOTAL	\$ 5.462.747

Fuente: (Elaboración Propia)

Los indicadores económicos se calcularon en base al flujo a 19 años.

VAN = \$11.269.475,01

TIR = 38%

TRI = 0,130

A continuación se muestra el flujo de caja sin considerar el flujo de fuentes y usos de fondos. Así es posible tener una primera aproximación en el análisis de factibilidad económica.

A-Tabla 12: Flujo de Caja Arreglo Sin Bacterias a Temperatura Ambiente

	0	1	2	3	4
Venta Fertilizante		\$24.250.308	\$24.250.308	\$24.250.308	\$24.250.308
Ahorro por uso de biogás		\$ 390.000	\$ 390.000	\$ 390.000	\$ 390.000
Total Ingresos		\$24.640.308	\$24.640.308	\$24.640.308	\$24.640.308
Costos Fijos		\$20.361.130	\$20.361.130	\$20.361.130	\$20.361.130
Costo Bacterias		\$2.404.584	\$2.404.584	\$2.404.584	\$2.404.584
Costos Totales		\$22.765.714	\$22.765.714	\$22.765.714	\$22.765.714
Depreciación		\$ 223.137	\$ 223.137	\$ 223.137	\$ 223.137
Inversión	\$ 5.462.747				
Flujo de Caja	\$ 5.462.747	\$2.097.731	\$2.097.731	\$2.097.731	\$2.097.731

	5	6	7	8	9
Venta Fertilizante	\$24.250.308	\$24.250.308	\$24.250.308	\$24.250.308	\$24.250.308
Ahorro por uso de biogás	\$ 390.000	\$ 390.000	\$ 390.000	\$ 390.000	\$ 390.000
Total Ingresos	\$24.640.308	\$24.640.308	\$24.640.308	\$24.640.308	\$24.640.308
Costos Fijos	\$20.361.130	\$20.361.130	\$20.361.130	\$20.361.130	\$20.361.130
Costo Bacterias	\$2.404.584	\$2.404.584	\$2.404.584	\$2.404.584	\$2.404.584
Costos Totales	\$22.765.714	\$22.765.714	\$22.765.714	\$22.765.714	\$22.765.714
Depreciación	\$ 223.137	\$ 223.137	\$ 223.137	\$ 223.137	\$ 223.137
Inversión					
Flujo de Caja	\$2.097.731	\$2.097.731	\$2.097.731	\$2.097.731	\$2.097.731

Fuente: (Elaboración Propia)

	10	11	12	13	14
Venta Fertilizante	\$24.250.308	\$24.250.308	\$24.250.308	\$24.250.308	\$24.250.308
Ahorro por uso de biogás	\$ 390.000	\$ 390.000	\$ 390.000	\$ 390.000	\$ 390.000
Total Ingresos	\$24.640.308	\$24.640.308	\$24.640.308	\$24.640.308	\$24.640.308
Costos Fijos	\$20.361.130	\$20.361.130	\$20.361.130	\$20.361.130	\$20.361.130
Costo Bacterias	\$2.404.584	\$2.404.584	\$2.404.584	\$2.404.584	\$2.404.584
Costos Totales	\$22.765.714	\$22.765.714	\$22.765.714	\$22.765.714	\$22.765.714
Depreciación	\$ 223.137	\$ 223.137	\$ 223.137	\$ 223.137	\$ 223.137
Inversión					
Flujo de Caja	\$2.097.731	\$2.097.731	\$2.097.731	\$2.097.731	\$2.097.731

	15	16	17	18	19
Venta Fertilizante	\$24.250.308	\$24.250.308	\$24.250.308	\$24.250.308	\$24.250.308
Ahorro por uso de biogás	\$ 390.000	\$ 390.000	\$ 390.000	\$ 390.000	\$ 390.000
Total Ingresos	\$24.640.308	\$24.640.308	\$24.640.308	\$24.640.308	\$24.640.308
Costos Fijos	\$20.361.130	\$20.361.130	\$20.361.130	\$20.361.130	\$20.361.130
Costo Bacterias	\$2.404.584	\$2.404.584	\$2.404.584	\$2.404.584	\$2.404.584
Costos Totales	\$22.765.714	\$22.765.714	\$22.765.714	\$22.765.714	\$22.765.714
Depreciación	\$ 223.137	\$ 223.137	\$ 223.137	\$ 223.137	\$ 223.137
Inversión					
Flujo de Caja	\$2.097.731	\$2.097.731	\$2.097.731	\$2.097.731	\$2.097.731

Fuente: (Elaboración Propia)

**ANEXO 2: Factores de emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI) estándar por combustión, por tipo de energético.**

En este Anexo se presentan los factores de emisión por defecto para las emisiones de GEI por combustión de combustible, específicamente de tipo orgánico.

A-Tabla 13: Factores de emisión estándar para combustión de energéticos (kg de GEI por TJ con base en poder calorífico neto)

Energético		CO <sub>2</sub>			CH <sub>4</sub>			N <sub>2</sub> O		
		Factor de emisión estándar	Rango Bajo	Rango Alto	Factor de emisión estándar	Rango Bajo	Rango Alto	Factor de emisión estándar	Rango Bajo	Rango Alto
Biocombustibles Sólidos	Leña	112.000	95.000	132.000	30	10	100,0	4,0	1,5	15,0
	Black liquor	95.300	80.700	110.000	3	1	18,0	2,0	1,0	21,0
	Otras biomásas primarias sólidas	100.000	84.700	117.000	30	10	100,0	4,0	1,5	15,0
	Carbón vegetal	112.000	95.000	132.000	30	10	100,0	4,0	1,5	15,0

Fuente: (IPCC, 2006)

A-Tabla 14: Factores de emisión estándar para combustión de energéticos (kg de GEI por TJ con base en poder calorífico neto) (Continuación)

Biocombustibles Líquidos	Biogasolina	70.800	59.800	84.300	3	1	10,0	0,6	0,2	2,0
	Biodiesel	70.800	59.800	84.300	3	1	10,0	0,6	0,2	2,0
	Otros combustibles líquidos	79.600	67.100	93.300	3	1	10,0	0,6	0,2	2,0
Biomasa en gas	Gas de relleno sanitario	54.600	46.200	66.000	1	0,3	3,0	0,1	0,0	0,3
	Biogás	54.600	46.200	66.000	1	0,3	3,0	0,1	0,0	0,3
Otros energéticos no-fósiles	Deshechos municipales (fracción de biomasa)	100.000	84.700	117.000	30	10	100,0	4,0	1,5	15,0

Fuente: (IPCC, 2006)

### ANEXO 3: Factores de emisión de metano (CH<sub>4</sub>) en la Gestión del Estiércol.

En este anexo se presentan los datos utilizados para desarrollar los factores de emisión por defecto de las emisiones de metano por gestión del estiércol.

Tabla 45: Factores de emisión de CH<sub>4</sub> por gestión del estiércol por temperatura para vacunos  
(kg CH<sub>4</sub>/cabeza/año)

Características	Especies de Ganado	Factores de emisión de CH <sub>4</sub> según la temperatura promedio anual (°C)																		
		Frío					Templado										Cálido			
		≤10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	≥28
Sistemas de base líquida para estiércol de vacas lecheras y el estiércol del resto del ganado vacuno se gestiona como sólidos y depositando en pasturas o prados	Vacas lecheras	48	50	53	55	58	63	65	68	71	74	78	81	85	89	93	98	105	110	112
	Otros vacunos	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Sistemas líquidos/fangos y pozos para estiércol.	Vacas lecheras	21	23	25	27	29	34	37	40	43	47	51	55	59	64	70	75	83	90	92
	Otros vacunos	6	7	7	8	8	10	11	12	13	14	15	16	17	18	20	21	24	25	26

Fuente: (IPCC, 2006)