

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL
FACULTAD REGIONAL CÓRDOBA
INGENIERÍA INDUSTRIAL



PROYECTO FINAL

ANÁLISIS DE PROVEEDORES PARA PLANTA DE BIOGÁS CLEANERGY VILLA DEL ROSARIO I

**Evaluación de sustratos y proveedores para la instalación de una
central térmica de generación de energía renovable**

Autores:	Gastón, Marcos Asiel	Legajos: 58161
	Leirião Alves, Gustavo	81644
	Manera, Maria Eugenia	59967

Tutor: Prof. Ing. Nirich, Sergio

CÓRDOBA

2018

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL
FACULTAD REGIONAL CÓRDOBA
CARRERA DE GRADO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
PROYECTO FINAL

Autores:	Gastón, Marcos Asiel	Legajos: 58161
	Leirião Alves, Gustavo	81644
	Manera, Maria Eugenia	59967

**ANÁLISIS DE PROVEEDORES PARA PLANTA DE BIOGÁS
CLEANERGY VILLA DEL ROSARIO I**

Tesis presentado a la Carrera de Grado en Ingeniería Industrial de la Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Córdoba como Proyecto Final para la obtención del título de Ingeniero Industrial.

Profesor orientador: Ing. Nirich Ronga, Sergio

Córdoba

2018

RESUMEN

Cuando se habla de sostenibilidad, citan conceptos como calentamiento global, energías renovables, biocombustibles y economía circular, cuyas áreas de estudio se muestran cada vez más presentes en la actualidad. La creciente demanda y carencia de fuentes alternativas de energía y recursos renovables están cada vez más presentes en la realidad económica industrial. Entre las fuentes conocidas de energía renovable, se destaca el biogás, una mezcla de gases compuesto principalmente por metano y dióxido de carbono, que puede ser generado por la digestión anaeróbica de materias primas orgánicas. Una de sus restricciones, sin embargo, está en la calidad y en la cantidad de materia orgánica utilizada, que influyen totalmente en el proceso de digestión anaeróbica. Este trabajo tiene por objetivo hacer un análisis de sustratos y proveedores para una planta de biogás que será instalada en un criadero de cerdos en la ciudad de Villa del Rosario, en la provincia de Córdoba, Argentina.

Palabras-clave: Biogás; biodigestor; energía renovable; sostenibilidad; sustratos; residuos orgánicos.

ABSTRACT

When talking about sustainability, it is common to cite concepts such as global warming; renewable energies, biofuels and circular economy, whose areas of study are increasingly present today. The growing demand and lack of alternative sources of energy and renewable resources are increasingly present in the industrial economic reality. Among the known sources of renewable energy, biogas stands out, a mixture of gases composed mainly of methane and carbon dioxide, which can be generated by the anaerobic digestion of organic raw materials. One of its restrictions, however, is in the quality and quantity of organic matter used, which totally influence the anaerobic digestion process. The objective of this work is to analyze substrates and suppliers for a biogas plant that will be installed in a pig farm in the city of Villa Del Rosario, in the province of Córdoba, Argentina.

Keywords: Biogas; biodigester; renewable energy; sustainability; substrates; organic waste.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	5
1.1. Problemática	7
1.2. Objetivos y justificaciones	8
1.3. Sobre la empresa Cleanergy	9
1.4. Sobre la empresa CROPS S.A.	10
2. MARCO TEÓRICO	11
2.1. Programa RenoVar	11
2.2. Aspecto Legal (Ambiental-Energía)	11
2.3. Economía Circular	12
3. MARCO TÉCNICO	14
3.1. El proceso de digestión anaeróbica	14
3.2. Técnicas de codigestión: Mezcla completa	15
3.3. Técnicas basadas en el consumo del sustrato	18
3.4. Volumen de Mezcla de residuos	18
3.5. Codigestión de residuos orgánicos	20
3.5.1. Codigestión de residuos ganaderos y residuos mataderos.....	21
3.5.2. Codigestión de residuos de la industria láctea	22
3.5.3. Codigestión de FORSU (Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos).22	
3.6. Biogás	24
3.7. Planta de Biogás	26
4. DESARROLLO	32
4.1. Sustratos orgánicos	32
4.2. Empresas Proveedoras	39
4.2.1. Categoría 1: Proveedores actuales del proyecto	42
4.2.2. Categoría 2: Proveedores potenciales	42
4.2.3. Categoría 3: Proveedores de contingencia	43
4.3. Logística del proyecto	44
4.3.1. Logística de los sustratos líquidos	48
4.3.2. Logística de los sustratos sólidos.....	51
4.3.3. Volúmenes y recolección	54
4.4. Escenarios	57
4.5 Sustentabilidad	61
4.6 Indicadores	67
5. CONCLUSIÓN	70

REFERENCIAS	73
ANEXOS	74
ANEXO I - Modelo matemático del análisis logístico para los sustratos líquidos....	74
ANEXO II - Modelo matemático del análisis logístico para los sustratos sólidos	76

1. INTRODUCCIÓN

La sostenibilidad es un tema fundamental que hoy se hace presente en la realidad del siglo XXI. No sólo las industrias como diversos otros sectores de la economía demuestran preocupaciones y actuaciones al respecto. Cuando se habla de sostenibilidad, no hay cómo abordarla si no en sus tres pilares fundamentales: económico, social y ambiental. Con el avance de la globalización y del progreso industrial, la búsqueda de recursos renovables y fuentes alternativas de energía se muestran cada vez más relevantes, así como el impacto ambiental resultante de las actividades y procesos involucrados merecen también mayor atención.

Según Mueller (2007), la relación entre sistema económico y medio ambiente ocurre de la siguiente forma: el sistema económico interactúa con el medio ambiente extrayendo recursos naturales y devolviendo residuos. Tanto la producción como el consumo de bienes generan degradables y residuos que se devuelven al medio ambiente. El aspecto que hoy transmite cierta preocupación es el hecho de que la extracción de recursos naturales y la generación de residuos tomaron tanta dimensión que el planeta ya no es capaz de sostenerlos. La escala y el estilo dominante de crecimiento del sistema económico necesitan nuevas fuentes de recursos naturales y energéticos que no comprometan generaciones futuras.

Socialmente hablando, convertirse en sostenible actualmente es visto como una actitud positiva por parte de las empresas. El llamado "Green Marketing" es hoy un importante aspecto tomado en consideración por los consumidores conscientes que crecen día a día. En el ámbito económico, hay una serie de ventajas proporcionadas por el uso de prácticas sostenibles, reducción de costos de producción e insumos, mayor eficiencia energética, menor generación y destino adecuado de residuos y cumplimiento de normas ambientales son algunas de ellas.

Pero cuando se trata de la sostenibilidad, son muchas las formas y herramientas existentes para ponerla en práctica. Economía circular, evaluación del ciclo de vida, análisis de aspectos e impactos ambientales, informes GRI de sostenibilidad, eco-eficiencia, eco diseño, consumo responsable, producción más limpia (P+L) y energías renovables son algunos ejemplos.

En el contexto de las energías renovables, la tecnología actual proporciona algunas alternativas a las fuentes tradicionales como carbón mineral y petróleo, por ejemplo. Fuentes limpias y renovables, sin explotación de cualquier recurso primario, como la energía eólica y la energía solar fotovoltaica son menos contaminantes y más sostenibles desde el punto de vista de la explotación de recursos. Sin embargo, una de sus restricciones está en la discontinuidad, sea por la alta dependencia de incidencia solar, en el caso de paneles fotovoltaicos, o por la dependencia de vientos con velocidades mínimas en las turbinas eólicas. Como estos aspectos ambientales son incontrolables, es común que haya variaciones en los niveles de rendimiento de fuentes como estas.

Otra fuente de energía renovable que ha alcanzado un escalonamiento considerable es el biogás, mezcla de gases que contiene metano entre 50-65%, obtenido a través del procesamiento de materia orgánica en biodigestores por la acción de bacterias que realizan digestión anaeróbica. Alimentado por residuos orgánicos, desechos animales, cultivos energéticos y efluentes pecuarios, obteniendo como resultado fertilizante (abono líquido o sólido, si pasa por un separador de sólidos) y biogás, el cual, es una mezcla de metano, dióxido de carbono y trazas de otros gases.

Aunque sea una tecnología relativamente cara, los biodigestores no sólo contribuyen a la generación de energía, sino que también son una alternativa para auxiliar otro problema de ámbito mundial en el siglo XIX: la gran cantidad generada de residuos y su destino. Los residuos pueden ser convertidos en energía eléctrica y fertilizantes, convirtiéndose así en materia prima e insumos para una nueva producción, incorporados nuevamente al ciclo productivo. Justamente en este punto, se hace presente el concepto de economía circular. Además, se puede considerar otro beneficio que es la tierra o aguas que no se inutilizan o contaminan por acción de los residuos.

En Mayo del 2016 el Gobierno Nacional dispuso el inicio del proceso de convocatoria abierta para la contratación en el Mercado Eléctrico Mayorista (MEM) de energía eléctrica de fuentes renovables de generación, en el marco del denominado programa RenoVar. El programa, apunta a la generación de energías renovables para sumarlas a la oferta eléctrica del país, con el objetivo de instalar hasta 10.000 MW hacia el 2025. En el 2017 se aprobaron los proyectos para una segunda ronda denominada RenoVar2 donde la empresa Cleanergy Renovables S.A. salió ganadora con dos proyectos.

Se estima que en todo el territorio nacional existen cerca de 100 biodigestores utilizados únicamente para tratar los residuos internos, y solo 3 biodigestores que venden energía al estado, lo que representa una excelente oportunidad de negocio. A su vez, para hacer frente a la creciente crisis energética del país, la nación presentó programas como el RENOVAR para incentivar los proyectos de energía renovable y que sean rentables.

La empresa Cleanergy Renovables S.A. (de ahora en adelante Cleanergy) actúa en el país con la propuesta de generar energía renovable a través de biodigestores alimentados exclusivamente con residuos orgánicos. En uno de sus proyectos más recientes, se está desarrollando una planta de biogás para ser instalada en una granja porcina ubicada en los alrededores de la ciudad de Villa del Rosario, en la provincia de Córdoba.

La propuesta de Cleanergy es construir una planta de biogás, que incluye un biodigestor, tanques de tratamiento de residuos, sistema de control, moto generador y otros elementos, para generación de energía renovable a través de la digestión anaeróbica de residuos orgánicos coleccionados en la región. La planta de biogás se instala al lado del proveedor de residuos más voluminoso, evitando así su transporte. En el caso de Villa del Rosario, la planta de biogás estaría ubicada cerca de la empresa CROPS INVESTMENTS S.A., un criadero de cerdos que sería el principal proveedor de residuos orgánicos para el biodigestor.

Este trabajo tiene por objetivo desarrollar los aspectos fundamentales del proyecto en cuestión de los sustratos orgánicos y sus potenciales proveedores para dicha planta de biogás, detallando las operaciones y los procesos involucrados en su funcionamiento que constituyen la base del proyecto Villa del Rosario I. Además, se harán análisis complementarios al proyecto que también son relevantes para su puesta en marcha y sustentabilidad a largo plazo.

1.1. Problemática

En la actualidad los pasivos ambientales que dejan cada una de las industrias son cada vez mayores y más notables por los vecinos de la zona exigiendo así medidas para mitigarlos. En el caso del criadero de cerdos de CROPS INVESTMENTS S.A., al estar ubicado en cercanías de la ciudad de Villa del Rosario (a 1km del ejido urbano), la

problemática principal radica en el olor que llega a la ciudad cuando hay viento sur por no tener un eficiente sistema de tratamiento de sus efluentes.

1.2. Objetivos y justificaciones

El objetivo general del trabajo consiste en realizar un análisis de sustratos y proveedores para la planta de biogás que será implantada en la empresa CROPS. Esto se hace necesario para asegurar el buen desempeño y funcionamiento de la planta de biogás cuando esté en operación. Se pretende obtener información relevante para apoyar decisiones que se tomarán en el desarrollo y operación del biodigestor. El relevamiento permitirá una toma de decisiones informada en base a cantidad, calidad, rendimiento y distancia. Una vez planteado el contexto y la problemática fundamental del trabajo, se tienen del mismo los siguientes objetivos específicos:

- Analizar el proyecto de la planta Villa del Rosario I desde el punto de vista legal y normativo;
- Desarrollar los aspectos fundamentales del proyecto en cuestión de los sustratos orgánicos y sus proveedores para la planta de biogás;
- Analizar el proyecto de Cleanergy desde el punto de vista logístico;
- Determinar posibles escenarios para el funcionamiento de la planta de biogás, estimando posibles variaciones en el suministro y rendimiento de la planta;
- Buscar maneras de garantizar la sostenibilidad de la planta y la viabilidad del proyecto en un largo de 20 años;
- Determinar algunos indicadores para gestión y monitoreo del proyecto en su puesta en marcha y operación.

Para cada uno de los objetivos considerados, se adoptarán metodologías y herramientas distintas, adecuadas para desarrollarlos y alcanzarlos. Algunos análisis de datos y valores comprenden factores externos que son difíciles de medir, para lo cual se utilizan estimaciones y probabilidades.

La principal intención de los análisis y estudios en cuestión es obtener información para el apoyo en la toma de decisiones. Conociendo mejor las características y aspectos de los sustratos y proveedores, se puede desarrollar mejores condiciones para el

biodigestor, garantizando su buen funcionamiento y buenos rendimientos. Además, estimando posibles variaciones y eventualidades que pueden ocurrir a los sustratos, también se puede determinar los posibles efectos e impactos sobre el funcionamiento del biodigestor, y así anticipar y mitigar los mismos.

1.3. Sobre la empresa *Cleanergy*

Fundada en el año de 2015 con sede en Buenos Aires (CABA), la empresa cuenta con ingenieros químicos, industriales y biotecnólogos. Su principal actividad es la generación de energía renovable, limpia y sustentable a partir del biogás, utilizando residuos como recursos que crean valor para la comunidad, la industria y el medio ambiente.

La propuesta de Cleanergy es generar soluciones sustentables a problemas ambientales actuales. Los principales de estos problemas son: gestión de residuos de manera no sustentable y costosa, que no se adapta a normativas ambientales; alto costo y aumento en la frecuencia de cortes de suministro de energía (gas y electricidad); contaminación de suelos, aire y agua, y también riesgos sanitarios para los trabajadores que manipulan la materia.

Teniendo todo esto en cuenta, la empresa propone soluciones por la generación de energía renovable. Con esto, beneficia principalmente el sector agroindustrial y la comunidad. El uso de la energía renovable implica una serie de beneficios, como la independencia energética de la red, abastecimiento local de energía, menor riesgo de futuros aumentos en las tarifas, además de cooperar con la cuestión ambiental involucrada. En ese sentido, se logra un menor costo y espacio para el tratamiento y destino de residuos, mejora de estado de suelos y agua evitando contaminaciones y riesgos sanitarios, mejora en higiene y seguridad y aprovechamiento de la materia orgánica para generación de energía a partir del biogás.

El proceso de digestión anaeróbica trabajado en la empresa cuenta con tecnología de punta a nivel internacional, y con vasta experiencia en mercados avanzados como Canadá y Estados Unidos. Cuenta con un diseño innovador, siendo la más eficiente del mercado norteamericano. La tecnología ha sido implementada en más de 20 digestores

anaeróbicos de tamaños de 200 kW a 2 MW, con otros 10 proyectos en construcción actualmente.

Esta tecnología se ajusta a las necesidades agrícolas, industriales y municipales y permite procesar una gran variedad de insumos orgánicos generando biogás y fertilizante. El biogás producido es filtrado, deshidratado y utilizado en motores especialmente diseñados para producir energía renovable en forma de energía térmica y eléctrica (cogeneración). El calor generado se utiliza para calefaccionar los tanques de la planta y la electricidad generada alimenta a la propia planta. El excedente es inyectado en el sistema interconectado nacional (SIN).

1.4. Sobre la empresa CROPS S.A.

CROPS INVESTMENTS S.A. es una agropecuaria radicada en Villa del Rosario dedicada a la cría de ganado porcino magro. Desde el año 2010, año en que fue adquirido el establecimiento ha ido mejorando la calidad de sus procesos productivos. Actualmente logra una comercialización de aproximadamente 1200 animales por mes.

La empresa representa, para el proyecto en cuestión, el principal proveedor de sustratos, pues suministrará grandes volúmenes de purines de cerdo para la planta de biogás. Por esta razón, el proyecto determina su instalación en las cercanías de CROPS, evitando así el transporte de sus residuos orgánicos, que serían tratados directamente en la planta de biogás para generación de energía renovable.

2. MARCO TEÓRICO

En esta sección, se presentan las principales fundamentaciones teóricas en que el trabajo se basa.

2.1. Programa RenoVar

A partir del 2016 El Gobierno dio inicio a un proceso de convocatoria abierta para la contratación en el Mercado Eléctrico Mayorista (MEM) de energía eléctrica de fuentes renovables de generación, en el marco del denominado “programa RenoVar”

Esta Convocatoria Abierta es para la calificación y eventual adjudicación de ofertas de personas jurídicas nacionales o extranjeras, a los efectos de la celebración de contratos de abastecimiento de energía eléctrica generada a partir de fuentes renovables con CAMMESA (Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico) en representación de los Agentes Distribuidores y Grandes Usuarios del MEM, en aras de aumentar la participación de las fuentes renovables de energía en la matriz energética del país, para sumarlas a la oferta eléctrica, con el objetivo de instalar hasta 10000 MW hacia el 2025.

A partir de agosto del 2017 se lanza la segunda edición de este programa, es decir, RenoVar 2, en la cual Cleanergy entra en postulación como oferente y gana el proyecto para la planta de biogás de un biodigestor de 1MW en la localidad de Villa del Rosario.

2.2. Aspecto Legal (Ambiental-Energía)

En esta sección se mencionan normativas vigentes al día de la fecha, que fomentan una transición tanto en el aspecto domiciliario como industrial hacia un uso energético obtenido de fuentes renovables. El marco normativo que regula la industria en la que está inmerso el proyecto de producción de biogás por medio de un biodigestor anaeróbico y por ende es primordial asimilar.

- Ley 27.191 - En vigencia desde el 1 de enero del 2018 afecta a las empresas privadas, instituciones públicas y otros usuarios de energía que tengan un consumo mensual superior a los 300 KW. La primera exigencia es que el 8% de la energía

que consumen provenga de fuentes de energía renovable y para 2025 este porcentaje deberá llegar al 20%.

- Ley 27.424 - Esta ley tiene por objeto fijar las políticas y establecer las condiciones jurídicas y contractuales para la generación de energía eléctrica de origen renovable por parte de usuarios de la red de distribución, para su autoconsumo, con eventual inyección de excedentes a la red, y establecer la obligación de los prestadores del servicio público de distribución de facilitar dicha inyección, asegurando el libre acceso a la red de distribución.
- Ley nº 10.208 - Se incorpora al marco normativo ambiental vigente en la Provincia (Ley No 7.343) modernizando y definiendo los principales instrumentos de política y gestión ambiental y estableciendo la participación ciudadana en los distintos procesos de gestión.

Como aspectos clave para del presente proyecto trata: incentivación a empresas que reduzcan los riesgos relevantes para el ambiente; obliga a los titulares de la actividad generadora del pasivo o a los propietarios del inmueble, a remediar el sitio contaminado; se amplía la lista de proyectos sujetos obligatoriamente a presentación de estudio de impacto ambiental y audiencia pública, se añade la audiencia pública.

2.3. Economía Circular

El proyecto en estudio, acerca de una planta de producción de biogás, tiene las características que describe un modelo de economía circular donde podemos ver que la materia prima requerida en sus procesos, es residuo de otros rubros industriales, residuos que mayoritariamente son desechados en el ambiente de forma indebida.

La economía circular es un concepto económico que se interrelaciona con la sustentabilidad, y cuyo objetivo es mantener dentro de la economía los productos, los materiales y los recursos durante el mayor tiempo posible, generando ciclos, y que se reduzca al mínimo la generación de residuos. Se trata de implementar una nueva economía, circular - no lineal -, basada en el principio de cerrar el ciclo de vida de los productos, los servicios, los residuos, los materiales, el agua y la energía. Reducir, reusar y

reciclar son las componentes de la política de las 3 “R” que caracteriza al concepto de economía circular.

El sistema lineal de nuestra economía (extracción, fabricación, utilización y eliminación) ha alcanzado sus límites. Se empieza a vislumbrar, en efecto, el agotamiento de una serie de recursos naturales y de los combustibles fósiles. Por lo tanto, la economía circular propone un nuevo modelo de sociedad que utiliza y optimiza los stocks y los flujos de materiales, energía y residuos y su objetivo es la eficiencia del uso de los recursos.

La economía circular descansa en varios principios:

- El eco-concepción: considera los impactos medioambientales a lo largo del ciclo de vida de un producto y los integra desde su concepción.
- La ecología industrial y territorial: establecimiento de un modo de organización industrial en un mismo territorio caracterizado por una gestión optimizada de los stocks y de los flujos de materiales, energía y servicios.
- La economía de la “funcionalidad”: privilegiar el uso frente a la posesión, la venta de un servicio frente a un bien.
- El segundo uso: reintroducir en el circuito económico aquellos productos que ya no se corresponden a las necesidades iniciales de los consumidores.
- La reutilización: reutilizar ciertos residuos o ciertas partes de los mismos, que todavía pueden funcionar para la elaboración de nuevos productos.
- La reparación: encontrar una segunda vida a los productos estropeados.
- El reciclaje: aprovechar los materiales que se encuentran en los residuos.
- La valorización: aprovechar energéticamente los residuos que no se pueden reciclar.

En efecto, además de los beneficios ambientales, esta actividad emergente es creadora de riqueza y empleo (incluyendo las del ámbito de la economía social) en todo el conjunto del territorio.

3. MARCO TÉCNICO

En esta sección se presentarán las principales informaciones sobre el proceso de digestión anaeróbica que ocurre en el biodigestor, así como las variables que influyen en el proceso y sus rendimientos.

3.1. El proceso de digestión anaeróbica

La digestión anaeróbica es un proceso microbiológico de fermentación de la materia orgánica, en condiciones de ausencia de oxígeno, transformándose por la acción bacteriana los compuestos orgánicos en metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2). Este proceso se condiciona en gran medida por las condiciones en las que se desarrolla el proceso. Los parámetros de control más relevantes que conllevan una influencia reseñable en el proceso son:

- Temperatura: Lo más habitual es que las reacciones se desarrollen en una temperatura mesofílica (en torno a 35°C), pues en este rango la actividad de las bacterias hidrolíticas, acetogénicas y metanogénicas es máxima y similar.
- pH: Las bacterias metanogénicas son muy sensibles a las variaciones de pH, por lo que las condiciones óptimas para que se desarrolle el proceso se dan con un pH estable de alrededor de 7.0-7.2.

Compuestos presentes en el medio: Las bacterias metanogénicas son sensibles a la presencia de determinados compuestos en alta concentración: Metales pesados, fenoles, amonio, compuestos aromáticos y otros. Asimismo, la presencia de ácidos volátiles (como el ácido acético) influye en el metabolismo de las metanogénicas, optimizándolo cuando estos ácidos se encuentran en pequeñas concentraciones, e inhibiendo su actividad en concentraciones superiores a 2000 ppm. Además, existen otros parámetros, propios del digestor y de los residuos empleados, que influyen en el desarrollo del proceso:

- Tasa de Carga Orgánica (FCO): Describe la máxima cantidad de materia orgánica por unidad de volumen y tiempo, que puede introducirse en el digestor para su transformación en biogás sin que provoque una distorsión en el proceso. Se suele expresar en $\text{kg DQO}/\text{m}^3 \text{ día}$.

- Tiempo de retención hidráulico (TRH) o Tiempo de Retención de Sólidos (TRS): Es el tiempo de permanencia de un determinado residuo (líquido o sólido, respectivamente) en el digestor para que toda la sustancia orgánica se transforme en metano. Estos tiempos de retención son cruciales en el desarrollo del proceso, por lo que resulta conveniente determinar los tiempos de retención de la biomasa. El tiempo de retención es un parámetro que únicamente es exacto en los reactores tipo “batch”. Para las plantas de funcionamiento continuo, un valor aproximado será el que se obtiene de dividir el volumen del reactor por el volumen de sustrato diario alimentado. Los factores de diseño, la geometría del digestor, el mezclado etc. podrán hacer variar este parámetro de forma notable para algunos contenidos concretos del sustrato. Así el tiempo de retención mínimo a aplicar dependerá de la temperatura de trabajo y de la naturaleza del sustrato.
- Contenido en Materia Orgánica (MO) del Vertido: Si el proceso de biometanización se desarrolla de manera adecuada, el contenido en MO del efluente debería de ser muy bajo, señal de que se ha transformado en biogás la mayoría de los nutrientes disponibles. Si la carga orgánica es alta o, por ejemplo, existe una alta proporción de ácidos volátiles en el efluente, el proceso no se ha desarrollado convenientemente.
- Caudal de metano: La relación entre este parámetro y el contenido en materia orgánica del vertido, por ejemplo, da una medida bastante exacta del coeficiente de rendimiento del digestor. Todas estas características del proceso son propias de los residuos introducidos en el digestor, que por su propia naturaleza presenta unas u otras propiedades. En este sentido, existen residuos con características contrapuestas que “compensan” mutuamente sus carencias o excesos, al digerirse anaerómicamente de manera conjunta, optimizando así la producción de biogás. Esta técnica es lo que se conoce como codigestión, que trataremos en profundidad más adelante.

3.2. Técnicas de codigestión: Mezcla completa

La codigestión consiste en emplear una mezcla de diferentes tipos de residuos, de forma que se optimice la producción de biogás a obtener por la planta. La principal ventaja radica en el aprovechamiento de la sinergia de las mezclas, compensando las carencias de

cada uno de los sustratos por separado. Además de incrementar el potencial de producción de biogás, la adición de co-sustratos confiere una estabilidad adicional al sistema y reduce la dependencia del aporte de un único sustrato del que nutrir a la instalación.

Para comprender el delicado proceso de la mezcla de sustratos desde su aspecto químico y así poder visualizar en un simple estudio la correlación directa entre la composición de la mezcla y el porcentaje de metano y dióxido de carbono del biogás resultante, se puede analizar el trabajo de los carbohidratos, proteínas y lípidos, ya que estos tres tipos de macromoléculas se encuentran en todos los sustratos orgánicos biodegradables.

El proceso de digestión anaeróbica se divide en dos fases, una denominada “no metanogénica” y otra “metanogénica”. En la primera, los constituyentes complejos de las materias orgánicas biodegradables son desintegrados en moléculas más simples, los cuales sirven como materia prima para el desarrollo de los procesos subsecuentes.

En esta fase tienen lugar tres subprocesos que se realizan de forma simultánea; en primer lugar ocurre la hidrólisis donde las bacterias fermentativas convierten las macromoléculas procedentes de la desintegración de los residuos orgánicos en moléculas solubles: los polímeros complejos como los carbohidratos son hidrolizados a monómeros tales como azúcares y alcoholes, las proteínas a péptidos o aminoácidos y los lípidos a ácidos grasos de cadena larga. En la Imagen 1 se puede observar el esquema general.

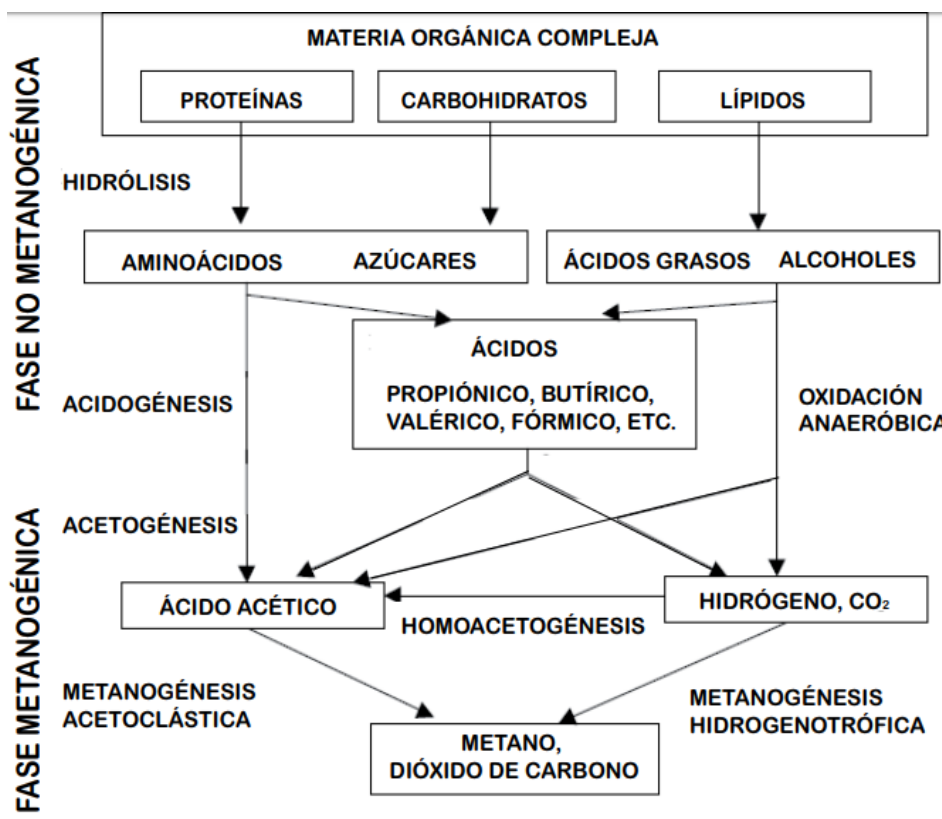


Imagen 1: Esquema general de transformaciones bioquímicas durante el proceso de digestión anaeróbica.

Fuente: Ladino (2011).

Seguidamente ocurre la fermentación (acidogénesis) de los metabolitos generados durante la hidrólisis para dar lugar a los ácidos grasos volátiles y dióxido de carbono, los cuales, a su vez, son transformados posteriormente en acetato a través de las bacterias acetogénicas. En este proceso, se genera acetato a partir de los ácidos orgánicos simples formados en la hidrólisis acidogénica, añadiendo al proceso hidrógeno molecular (H_2) y dióxido de carbono (CO_2). Por último, la metanogénesis se desarrolla en dos reacciones diferenciadas, por parte de las arqueobacterias metanogénicas:

- Las metanogénicas acetoclásticas (70% del total) transforman el acetato en metano (CH_4).
- Las metanogénicas hidrogenófilas (30% del total) convierten el hidrógeno molecular (H_2) y el dióxido de carbono (CO_2) en metano (CH_4).

La calidad del biogás obtenido es tanto mejor cuanto mayor sea el porcentaje de metano en la mezcla, ya que un alto componente de metano permite unos usos similares a los del gas natural.

Es importante diferenciar que la fase no metanogénica puede ocurrir a pH < 7 y la metanogénica a pH 7-8. Por ello dentro de la planta el hidrolizador funciona a pH 5, no metanogénica, y el digestor a pH 7, fase metanogénica.

3.3. Técnicas basadas en el consumo del sustrato

La disminución de algunos de los componentes del sustrato debido al consumo de estos por parte de los microorganismos que desarrollan el proceso de digestión anaeróbica, puede ser utilizada como base para establecer la biodegradabilidad anaeróbica del residuo. Estas mediciones se basan en la determinación de parámetros tales como análisis de sólidos (totales, suspendidos, fijos, volátiles), demanda química de oxígeno (total y soluble), carbono orgánico total, nitrógeno orgánico total, azufre, etc. Dentro de estas mediciones, la determinación periódica de la Demanda Química de Oxígeno soluble (DQO soluble) junto con el análisis de sólidos, constituyen un conjunto de parámetros primarios que permiten monitorear periódicamente el desarrollo del proceso de biodegradación de la materia orgánica. El balance de la DQO del sustrato antes y después de realizado el tratamiento anaeróbico permite ilustrar el concepto de la biodegradabilidad anaeróbica de un residuo.

3.4. Volumen de Mezcla de residuos

Para calcular el volumen de la mezcla de residuos se aplica la siguiente relación donde “ $V_{Residuos}$ ” es el volumen de la mezcla de residuos en el reactor necesario para cumplir con la razón de carga orgánica, “ $DQOR$ ” corresponde a la DQO en el reactor requerida para cumplir con la razón de carga y “ $DQO_{Residuos}$ ” corresponde a la concentración de la DQO en el residuo.

$$V_{Residuos} = \frac{V_{Líquido} \times DQOR}{DQO_{Residuos}}$$

La DQO es una medida indirecta del contenido de materia orgánica y compuestos oxidables en una muestra. Este parámetro está definido como la cantidad de oxígeno necesaria para realizar la oxidación del material orgánico biodegradable y otros compuestos susceptibles a ser oxidados, los cuales se encuentran contenidos en una muestra determinada.

Los Sólidos Totales (S.T.) son todo tipo de materia sólida contenida en el sustrato, comprendiendo los sólidos tanto orgánicos como inorgánicos y en estado solubles, en estado iónico o molecular, o insolubles.

Los Sólidos Volátiles (S.V.) es aquella porción de sólidos totales que se libera de una muestra, volatilizándose cuando se calienta durante dos horas a 600°C. El remanente de dicha volatilización son los componentes minerales de la muestra, es decir, las cenizas. Los S.V. contienen componentes orgánicos, los que teóricamente deben ser convertidos a metano (m³/kg).

$$\text{Coeficiente de Producción de Biomasa} = \frac{SSV}{DQO}$$

La movilidad de las bacterias metanogénicas dentro del sustrato se ve crecientemente limitada a medida que se aumenta el contenido de sólidos y por lo tanto puede verse afectada la eficiencia y producción de gas. A su vez, a mayor tamaño de sólidos, menor accesibilidad de las bacterias para degradar en un mismo tiempo todos sus componentes.

Experimentalmente se ha demostrado que una carga en digestores semicontinuos no debe tener más de un 8% a 12 % de sólidos totales para asegurar el buen funcionamiento del proceso. En la Tabla 1, se puede observar los porcentajes estimados de sólidos totales en la composición de algunos residuos orgánicos.

Materias primas	% Sólidos totales
Residuos animales	
Bovinos	13.4 – 56.2
Porcinos	15.0 – 49.0
Aves	26.0 – 92.0
Caprinos	83.0 – 92.0
Ovejas	32.0 – 45.0
Conejos	34.7 – 90.8
Equinos	19.0 – 42.9
Excretas humanas	17.0
Residuos vegetales	
Hojas secas	50.0
Rastrojo maíz	77.0
Paja trigo	88.0 – 90.0
Paja arroz	88.8 – 92.6
Leguminosas (paja)	60.0 – 80.0
Tubérculos (hojas)	10.0 – 20.0
Hortalizas (hojas)	10.0 – 15.0
Aserrín	74.0 – 80.0

Tabla 1: Datos promedios sobre el contenido de sólidos totales de diversos residuos.

Fuente: Varnero y Arellano, 1991.

En el caso de la receta del proyecto, el agua la aporta el estiércol de cerdo y el suero de las empresas lácteas. La forma de calcular el porcentaje de sólidos de la muestra es sumar los sólidos totales de todos los residuos y dividirlo por el volumen de residuos líquidos que ingresa diariamente.

3.5. Codigestión de residuos orgánicos

En seguida, se presentan algunos datos técnicos referenciales para el proceso de codigestión de algunos residuos orgánicos que hacen parte del proyecto Villa del Rosario I. Los mismos varían en tipo y composición, así como también cambian algunos parámetros que influyen en sus rendimientos para generación de biogás.

3.5.1. Codigestión de residuos ganaderos y residuos mataderos

La codigestión de residuos ganaderos y residuos de mataderos (contenido graso de los residuos animales y contenidos estomacales) genera altas producciones de metano con un rendimiento de 5 a 10 veces superior al de purines de cerdo, tomados de base. Este proceso, como se comentó anteriormente, mejora el rendimiento de producción de metano global de la mezcla, aumentándolo hasta cuatro veces con respecto al producido mediante el uso de dichos residuos no pasteurizados (Rutledge, 2004). Este incremento en la productividad es debido a que tras el tratamiento de pasteurización en el que el residuo se mantiene un cierto tiempo a altas temperaturas, los lípidos quedan más accesibles para la digestión anaerobia.

La pasteurización se hace con el objetivo de reducir las bacterias patógenas. La cantidad de lípidos es la misma con o sin pasteurización, lo que haría la pasteurización es mejorar el acceso a las macromoléculas, lo que en todo caso sería una mejora en la velocidad de producción de biogás. Es decir, pasteurizar podría aumentar la producción de biogás en un dado tiempo de retención.

En la Tabla 2, se observan las producciones de metano para diferentes subproductos animales con y sin pretratamiento previo de esterilización según estudios realizados en ensayos en discontinuo por el Swedish Institute of Agricultural and Environmental Engineering (JTI).

Residuo	Producción CH ₄ (m ³ /t)
Subproductos animales pasteurizados	225
Subproductos animales no pasteurizados	56
Mezclas de residuos de matadero	160
Residuos domésticos	130
Purines*	13

*Purines con contenido en sólidos volátiles (SV) del orden de 60-80 kg/t purín

Tabla 2: Producción de metano a partir de la digestión anaeróbica de diferentes subproductos animales

Fuente: Swedish Institute of Agricultural and Environmental Engineering (JTI).

Actualmente existen numerosas plantas industriales que realizan la codigestión a partir de residuos ganaderos y subproductos animales obteniendo buenos resultados en producción de biogás.

3.5.2. Codigestión de residuos de la industria láctea

Para la codigestión con los residuos de la industria láctea se debe realizar un estudio del suero de leche en las primeras horas de disposición del sustrato, debido a sus altos niveles de descomposición acorde pasan las horas. A continuación se presentan los valores estimativos que debe poseer el sustrato, para ser admitido dentro del biodigestor.

- DQO: 0,068 kg/l
- Materia grasa: 0,2%
- pH: 6,4 a 6,6
- Proteínas: 7%
- Sólidos suspendidos volátiles: más del 4%
- Sólidos totales: 6%

3.5.3. Codigestión de FORSU (Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos)

Para lograr un buen proceso de biometanización a partir del uso de la fracción orgánica de Residuos Sólidos Urbanos (RSU), estos deben pasar una etapa previa de pretratamiento donde a través de un equipo mezclador-homogeneizador coloca en suspensión acuosa la fracción orgánica donde un sistema mecánico separa las impurezas de dicha suspensión. Tras dicho proceso la fracción orgánica se traslada a un cilindro de carga y de aquí a un tanque desde donde llega al digestor.

La obtención de biogás en las plantas conocidas que realizan este tipo de codigestión se sitúa en unos valores comprendidos entre 26,7 a 58,7 m³/t mezcla, presentando un contenido de metano en el biogás superior al 65%.

Como se verá más adelante la cantidad de residuos generados por cada localidad es proporcional a la cantidad de habitantes, tal es así que la localidad de Villa del Rosario, uno de los municipios aledaños al proyecto, es la generadora del 75% de los RSU de la región estudiada con 22.000 habitantes, secundado por la localidad de Luque con 8.500 y en tercer lugar Calchín con 3.000.

El Gráfico 1 muestra la generación mensual de RSU por localidad, tomando los municipios cercanos al local de instalación de la planta de biogás. De los residuos de origen domiciliarios se analizó la composición de ellos, y se puede observar en el Gráfico 2.

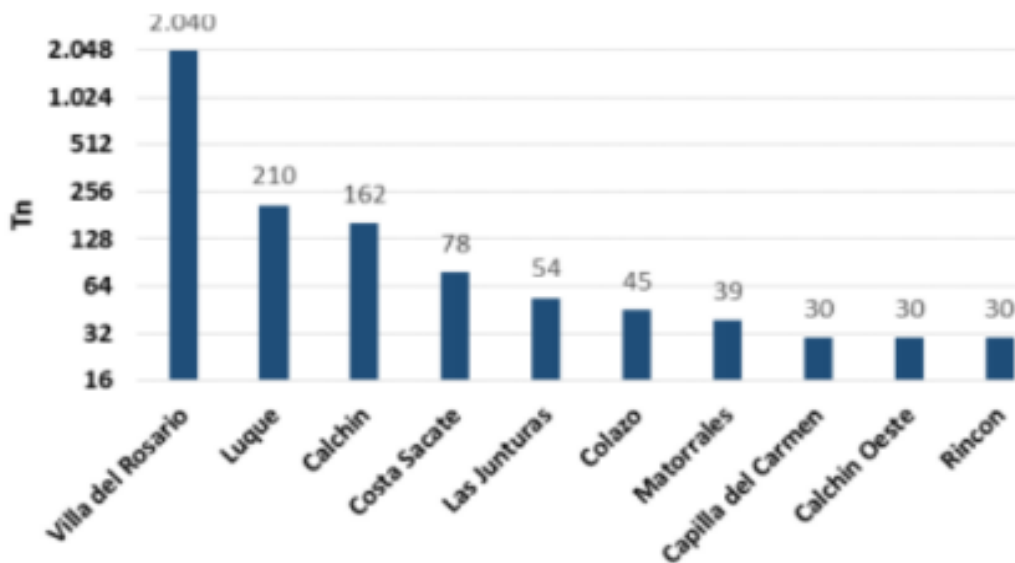


Gráfico 1: Generación mensual de RSU por localidad.
Fuente: Barra, Bonatti, Giussano (2017).

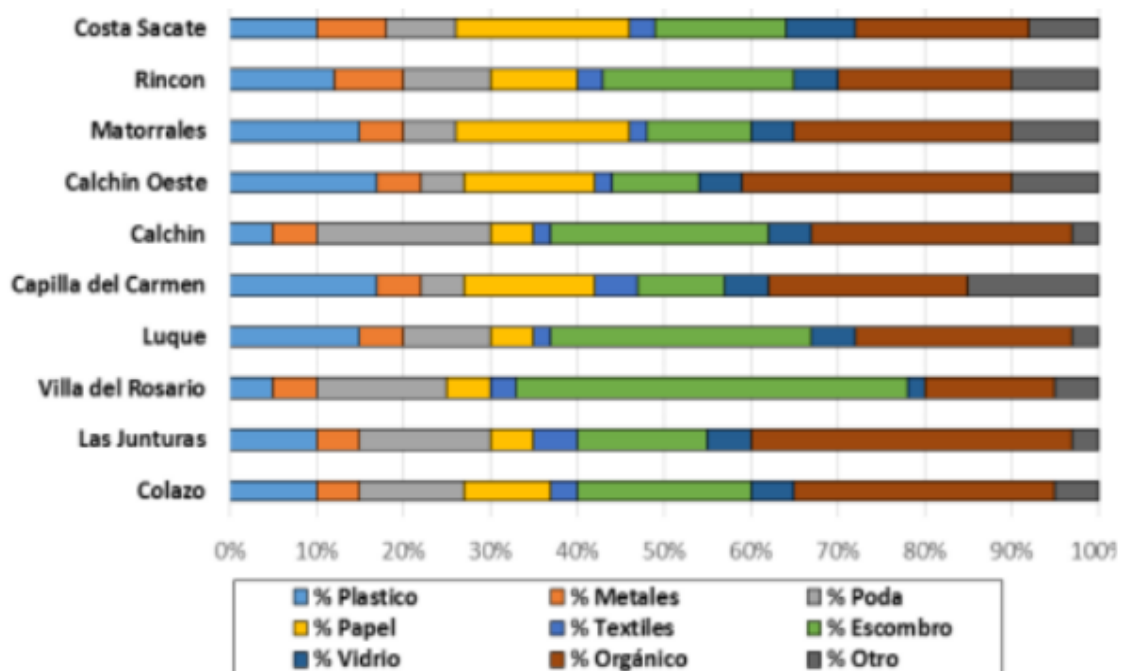


Gráfico 2: Composición química de los RSU por localidad.
Fuente: Barra, Bonatti, Giussano (2017).

Como se puede observar en casi todos los municipios, con excepción de Villa del Rosario, Luque y Rincón, la mayor parte de la composición de los RSU son residuos orgánicos, lo que puede representar un buen potencial para tratamiento en planta de biogás.

3.6. Biogás

El biogás es básicamente un biocombustible generado por materiales orgánicos en el proceso de biodigestión. Su mezcla de gases tiene en su composición principalmente Metano (CH_4) y gas carbónico (CO_2). En proporciones menores, hay también pequeños porcentajes de nitrógeno (N_2), hidrógeno (H_2), oxígeno (O_2) y gas sulfhídrico (H_2S). En el Gráfico 3, se puede observar la proporción de gases en su composición.

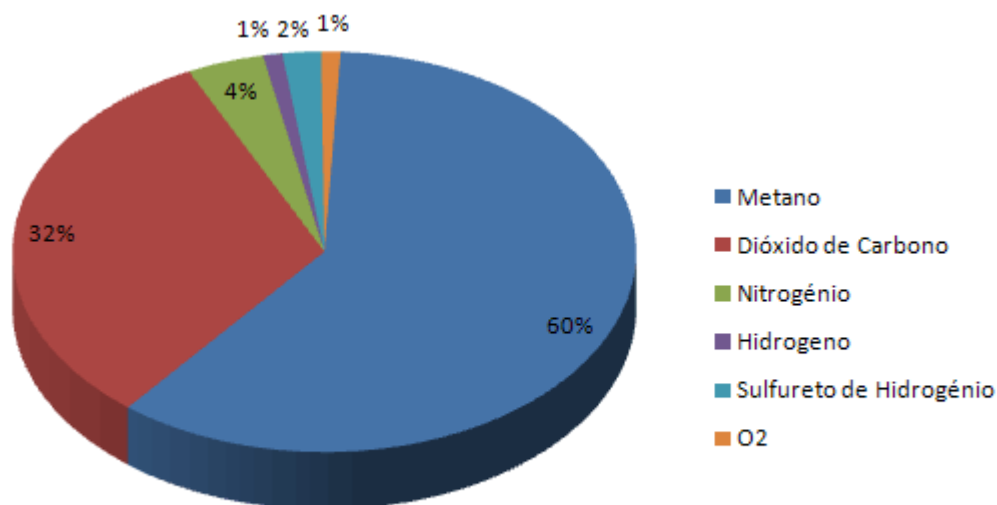


Gráfico 3: Composición en promedio del biogás.
Fuente: *Portal das Energias Renováveis* (Brasil).

Entre sus diversos usos, se puede destacar su utilización en motores de combustión, iluminación, energías térmica y eléctrica y el biometano como gas natural purificado. En el escenario de energías renovables, el biogás viene como una alternativa para la generación de energía eléctrica en sustitución al gas natural y otras fuentes fósiles. En la generación de energía del biogás, ocurre la conversión de la energía química del gas en energía mecánica por medio de un proceso controlado de combustión. Esta energía mecánica activa un generador que produce energía eléctrica.

El biogás también puede ser utilizado en calderas por medio de su quema directa para la cogeneración de energía. Es capaz de abastecer a comunidades aisladas, que pueden utilizar los residuos generados en la agricultura y la ganadería para suplir sus

necesidades energéticas. Además, el aprovechamiento de la energía del biogás procedente de los residuos orgánicos tanto industriales como domiciliarios representa un destino más sustentable.

El uso del biogás para generar energía también impide que el metano proveniente de la descomposición de la materia orgánica sea liberado a la atmósfera al transformarse en agua y gas carbónico por el proceso de quema, ya que el efecto negativo sobre el calentamiento del planeta es 28 veces mayor que el del dióxido de carbono a 100 años.

En la Imagen 2, se puede observar el uso del biogás desde su producción.

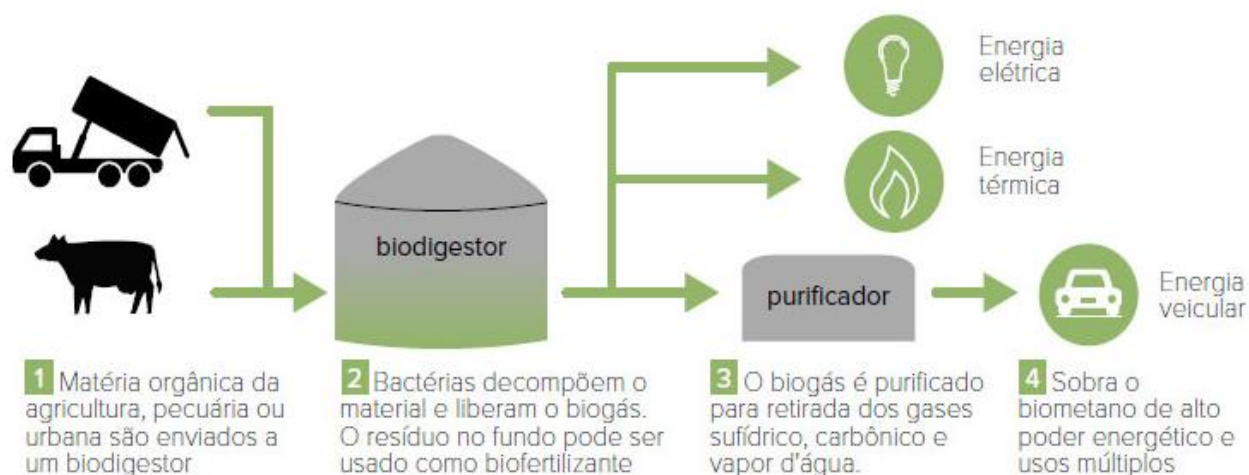


Imagen 2: Usos del biogás desde su producción.

Fuente: Adaptación de *ABiogás* (Brasil).

La energía se genera, a través de la combustión del biogás en la planta de cogeneración. Durante la generación de electricidad en la planta también se genera calor. Este calor generado puede utilizarse para calentar edificios, piscinas o para secar madera, productos de cosecha o el digestato, para lograr escamas del mismo. Con un concepto inteligente de aprovechamiento del calor se aumenta la eficiencia de la planta de biogás de forma considerable.

A través de diferentes métodos, el biogás puede purificarse de los componentes indeseados y puede alimentar a la red de gas natural como metano o biogás natural. Aún, como combustible, el metano dispone de un alto potencial de ahorro de CO₂. Con la adición de metano al gas natural, la emisión de CO₂ puede reducirse de forma considerable en comparación de la gasolina.

3.7. Planta de Biogás

Una planta de biogás en un establecimiento ganadero es una instalación donde se mezclan los purines con materia orgánica y se realiza lo que se conoce con el nombre de codigestión anaeróbica. Como vimos, la codigestión se basa en mezclar diferentes sustratos para que se compensen entre sí y se obtenga una producción de biogás óptima y un digestato que es un buen fertilizante para aplicar en los campos. El biogás producido se valoriza en un equipo de cogeneración y el resultado final es energía eléctrica y térmica de origen renovable. En la Imagen 3, se puede observar su principio de funcionamiento.

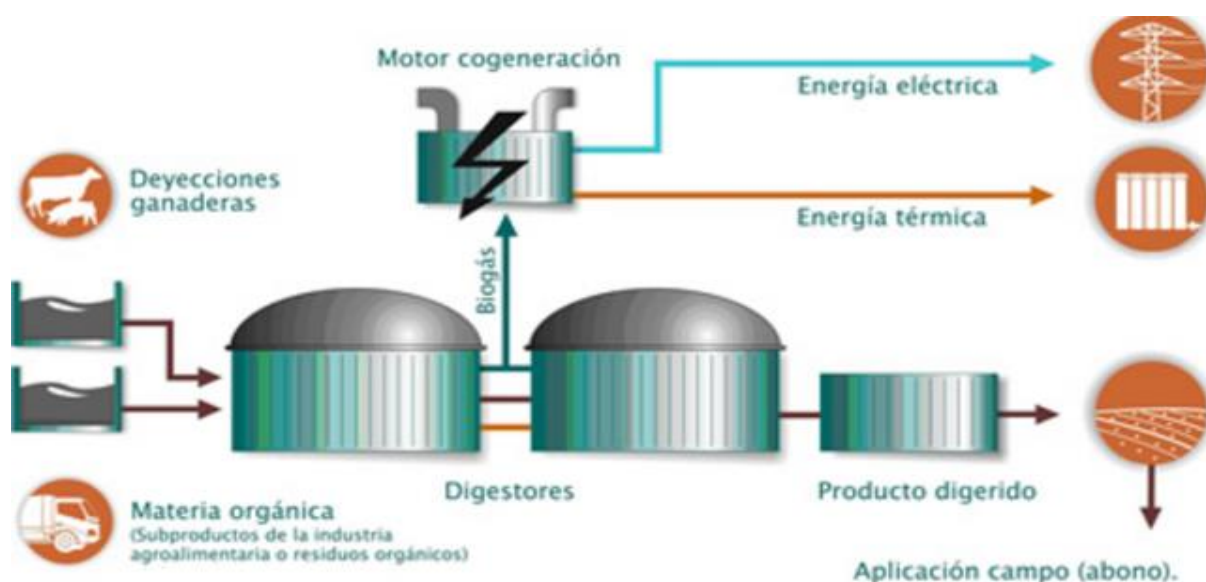


Imagen 3: Planta de biogás y sus componentes básicos.

Fuente: Ecobiogas (España).

Se reciben materias orgánicas, deyecciones orgánicas un 35% y subproductos agrícolas y/o residuos industriales un 65%, que se mezclan y son conducidos hacia los digestores. Dentro de estos grandes recipientes cerrados, sin aire del exterior y con condiciones óptimas de temperatura, es donde las bacterias actúan. Se produce una digestión anaeróbica controlada o descomposición de la materia orgánica. De aquí se obtiene biogás y digestato. El biogás se utiliza como único combustible en unos equipos de cogeneración que transforman el biogás en energía eléctrica y térmica de origen renovable.

El funcionamiento de una planta de biogás incluye una serie de procesos y operaciones desde el ingreso de los residuos orgánicos hasta su producción. Hay transformaciones físicas, químicas y biológicas involucradas y una serie de variables que determinan los rendimientos de la planta ya analizados en los capítulos anteriores.

Para representar mejor sus componentes principales y su esquema de funcionamiento, tomamos inicio en la Imagen 4.

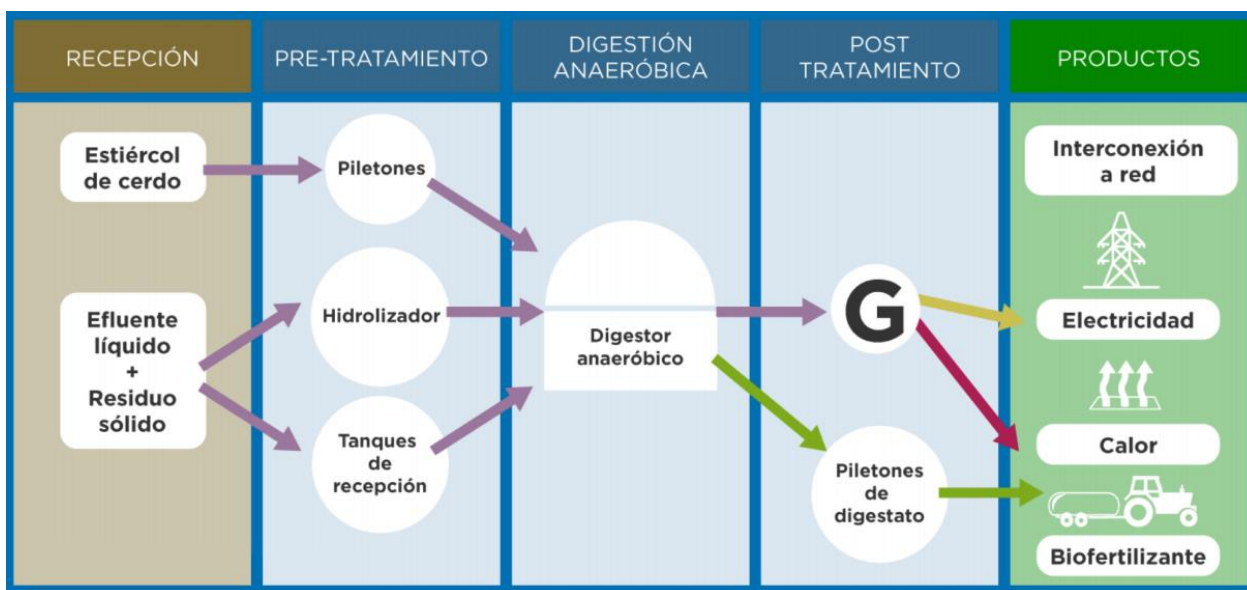


Imagen 4: Etapas principales del proceso de funcionamiento de la planta.
Fuente: Cleanergy.

En la primera etapa de recepción, se recibe la carga bacteriológica proveniente del excremento de cerdo más las sustancias orgánicas residuales de las industriales locales y de la zona. A continuación el estiércol de cerdo es redirigido hacia unos piletos de pretratamiento donde se estabilizan y homogenizan las diferentes disposiciones diarias, a su vez, en esta etapa de pre-tratamiento los efluentes líquidos y residuos sólidos pasan directamente al hidrolizador pero de ser necesario, los residuos sólidos pueden ser pre-seleccionados por el separador de sólidos para eliminar elementos indeseados.

En la etapa de digestión anaerobia, el digestor trabaja bajo características fisicoquímicas ya descritas anteriormente. El producto final de este proceso de fermentación es el biogás que se almacena en el techo del contenedor, y desde allí se transporta y se quema en la planta de cogeneración para la generación de corriente eléctrica y calor. La corriente eléctrica alimenta directamente a la red eléctrica. Al final, el

calor generado puede utilizarse para calentar edificios o secar madera o productos de cosecha.

Otro producto final que se obtiene de este proceso es el digestato, que se almacenará en piletones para luego ser utilizado como biofertilizante. Este subproducto no puede ser utilizado de forma directa sobre el campo (riego) ya que anteriormente se deben medir los niveles de nitrógeno y fósforo del suelo para completar su faltante con los niveles del digestato. La ventaja del digestato con respecto a la distribución uniforme de excremento sobre el campo (estercolero), es que tiene una menor viscosidad y, por consiguiente, entra más rápidamente en el suelo con mayor valor fertilizante.

En Argentina, la provincia de San Luis inauguró la primera planta de biogás del país. Se trata del primer biodigestor que se alimenta de residuos sólidos urbanos (RSU) para la generación de energía. Según informa el portal Argentina.ar, la obra consiste en dos biodigestores de 200 m³ y tiene una capacidad para procesar hasta tres toneladas de RSU orgánicos por día, lo que permite generar aproximadamente 300 m³ de biogás por día. Las autoridades informaron que el biogás generado se utiliza en un grupo electrógeno de 100 kilovatios de potencia, con el fin de satisfacer las necesidades energéticas de la mencionada planta separadora de residuos.

Ya en el país hay proyectos en funcionamiento con tecnología probada en diferentes regiones con distintos requerimientos de adecuación, como el de agitación y calefacción para los biodigestores. Hay entre 60 y 80 plantas en el país, sumando mini-biodigestores o mini-lagunas cubiertas de consumo domiciliario. Sin embargo, sólo 20 de ellas corresponden a grandes instalaciones.

En ámbito internacional, el biogás representa una importante fuente de energía renovable desarrollada en muchos países, sobre todo en Europa. En los Estados Unidos, hay también instalaciones de gran capacidad, de hasta 2,5 MW. En la Imagen 5, se puede observar una planta ubicada en Massachusetts de una potencia instalada de 1 MW. Sus equipos y componentes principales son básicamente los descritos anteriormente, y pueden ser observados en la Imagen 6.



Imagen 5: Planta de biogás de Deerfield, Massachusetts.
Fuente: Cleanergy.

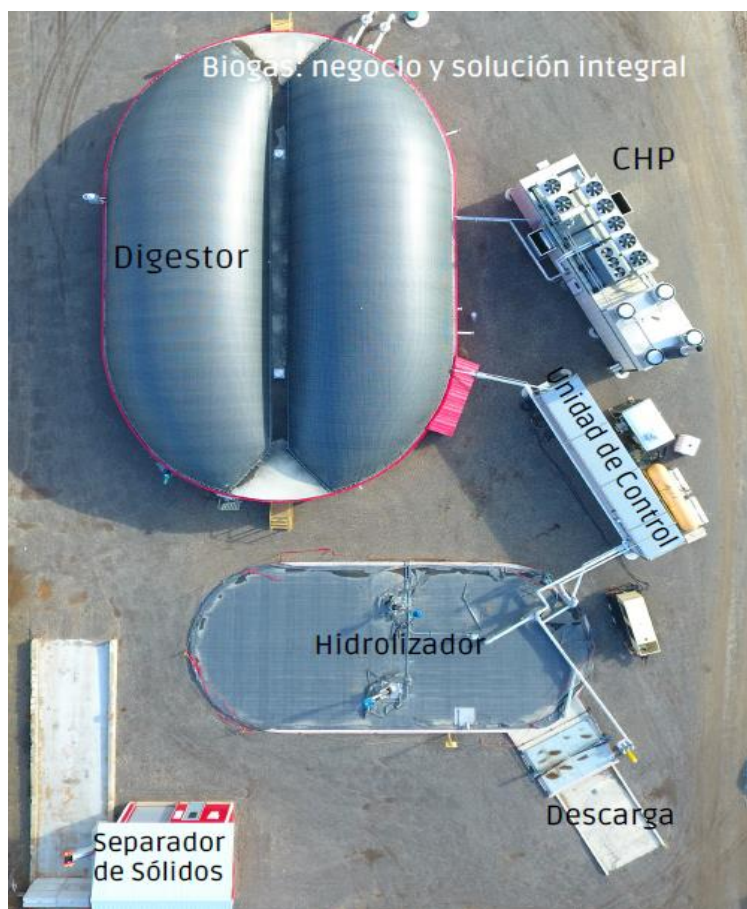


Imagen 6: Componentes de la planta de biogás de Deerfield, Massachusetts.
Fuente: Cleanergy.

El proyecto Villa del Rosario I es de una planta de biogás de 1MW de potencia, generación equivalente a 3000 casas de familia. Para esto, la planta procesaría cerca de 120 toneladas diarias de residuos tratados (estiércol de cerdo, residuos de la industria láctea, residuos de frigorífico, gomas vegetales, etc.).

La inversión total estimada es 4,8 millones de dólares. El servicio de recolección de residuos sería diario, y serán emitidos certificados de disposición final para los proveedores. El tiempo estimado es de 6 a 9 meses para su construcción y 3 meses para puesta en marcha. Algunos datos técnicos de la planta y sus equipos principales son presentados en lo que sigue:

- Estiércol: +40 m³ x día
- Residuos externos: +70m³(ton) por día
- Temperatura: 35-40 °C – Mesofílico
- pH Hidrolizador 5-6 // pH Digestor 7-8
- CHP: 1 MW (consumo 500 m³ de biogás x hora)
- Producción de Energía: 20000 kWh por día
- 1 biodigestor de capacidad máxima de 3000 m³
- 1 hidrolizador de 500 m³ de capacidad
- 1 tanque de recepción de sustratos de 100 m³ de capacidad
- 1 tanque de recepción de estiércol de 100 m³ de capacidad

El proyecto incorpora beneficios para muchas entidades y a diferentes escalas. El desarrollo de la región sería considerablemente favorecido por la planta de biogás, contribuyendo a su vez a un crecimiento sustentable. Los principales beneficios planteados por Cleanergy con la implementación del proyecto son: generación de energía renovable, rentabilidad del negocio, cumplimiento legal de normativas ambientales, eliminación de olores y residuos, generación de fertilizante, sostenibilidad y diversificación de ingresos.

El desarrollo del proyecto consiste básicamente en 4 etapas: pre-factibilidad, factibilidad, desarrollo del proyecto, gestión del proyecto y puesta en marcha. En la Imagen 7, se puede observar la estructura esquemática de las fases del proyecto.



Imagen 7: Fases de desarrollo del proyecto Villa del Rosario I.

Fuente: Cleanergy.

La Imagen 8 presenta una vista aérea de la empresa CROPS y el área donde la planta estaría ubicada al lado del criadero.

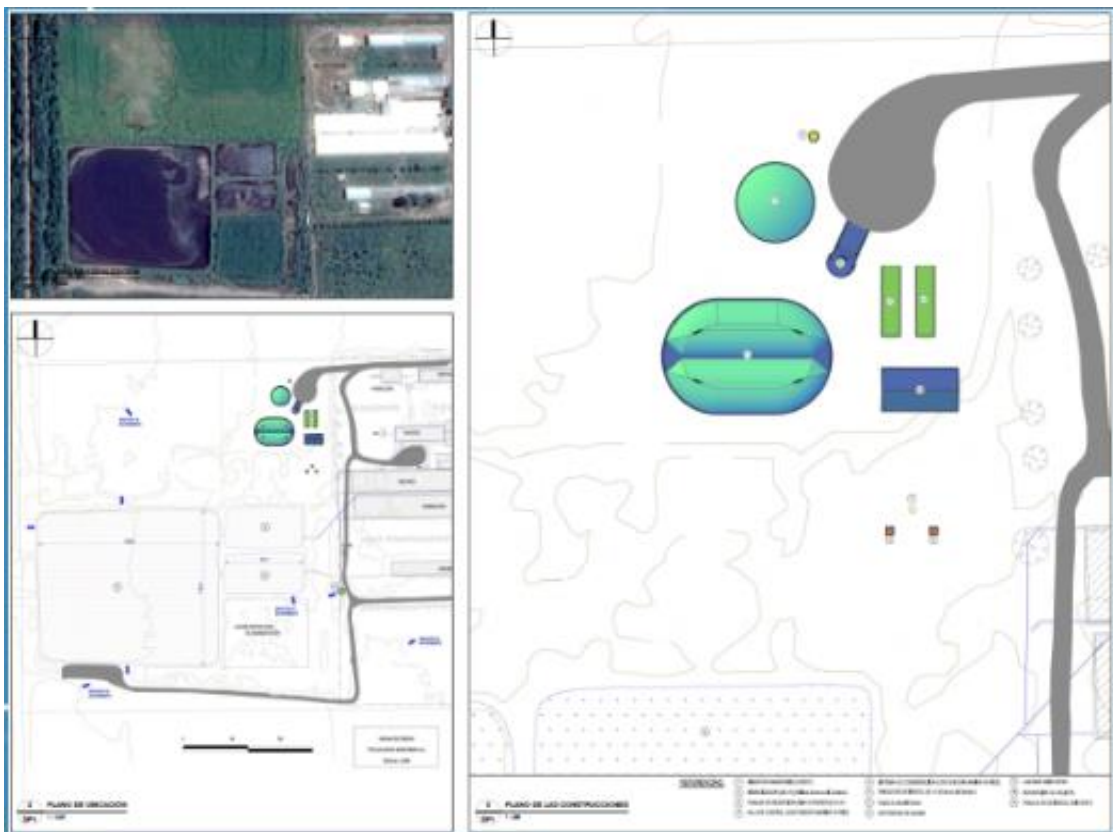


Imagen 8: Plan de ubicación de la planta de biogás Villa del Rosario I.

Fuente: Cleanergy.

4. DESARROLLO

El desarrollo de la tesis incorpora una serie de análisis sobre los aspectos importantes y condiciones para el funcionamiento de la planta de biogás, siguiendo la línea de los objetivos planteados. A continuación, se hará un análisis de los sustratos orgánicos para la planta Villa del Rosario I, desde sus principales aspectos relevantes para el proyecto y una presentación y clasificación de sus proveedores. Seguidamente, se desarrolla un análisis del proyecto desde el punto de vista logístico, seguido por algunos escenarios propuestos para su puesta en marcha. Al final, se hace algunas propuestas para lograr una mayor sustentabilidad a largo plazo para el proyecto Villa del Rosario I, concluyendo el análisis planteando algunos indicadores para su gestión y monitoreo.

4.1. Sustratos orgánicos

El proyecto de la planta de biogás Villa del Rosario I cuenta con una gran variedad de sustratos orgánicos para suministrar, lo que puede lograr buenos rendimientos para la generación de biogás a partir de la técnica de mezcla completa. Los sustratos varían en función de su tipo, estado físico, empresa proveedora y cantidades diarias suministradas. Como cada uno tiene su composición y sus características físico-químicas, los potenciales de rendimiento para generación de biogás a partir de su digestión anaeróbica también cambian de uno para otro.

Los sustratos son, con excepción del suero de leche, todos en estado sólido. Para hacer los cálculos y adoptar un estándar de análisis, trabajaremos con el peso de cada uno de ellos en toneladas. Así, en el caso del suero de leche, hay varios estudios hechos en los que se lo analiza químicamente en laboratorio para determinar su densidad. Los valores determinados por dichos estudios se encuentran entre 1020 y 1030 kg/m³. Así, para los volúmenes líquidos diarios suministrados de suero de leche, se adopta el peso correspondiente en toneladas con base en una densidad referencia de 1025 kg/m³ de suero.

Los rendimientos esperados para generación de biogás son determinados en base a la cantidad de materia orgánica que hay en la composición de los sustratos. La técnica que se usa hoy para este análisis es la que se llama separación por sólidos volátiles, que consiste en una destilación para evaporar los líquidos y después separar los minerales de

los sólidos a temperaturas más altas (cerca de 500°C). Con esta última separación, se hace el análisis químico de los minerales, determinando cuánto hay de proteínas, carbohidratos y lípidos en la materia sólida, y con esto se puede determinar la proporción de conversión en biogás para cada uno de ellos con base en parámetros de referencia (por ejemplo, el volumen promedio generado de biogás por la digestión de 1 kg de proteína).

La técnica de sólidos volátiles permite determinar los rendimientos individuales para cada sustrato. Naturalmente, para el proyecto en cuestión, algunos tienen mayores potenciales de generación de biogás y otros no tanto. Las gomas vegetales, por ejemplo, tienen un alto potencial de conversión de biogás debido al hecho de que hay muchos lípidos en su composición (1 tonelada puede generar hasta cerca de 600 m³). En el Gráfico 4, se puede comparar los potenciales de generación para cada uno de los sustratos del proyecto de la planta Villa del Rosario I.

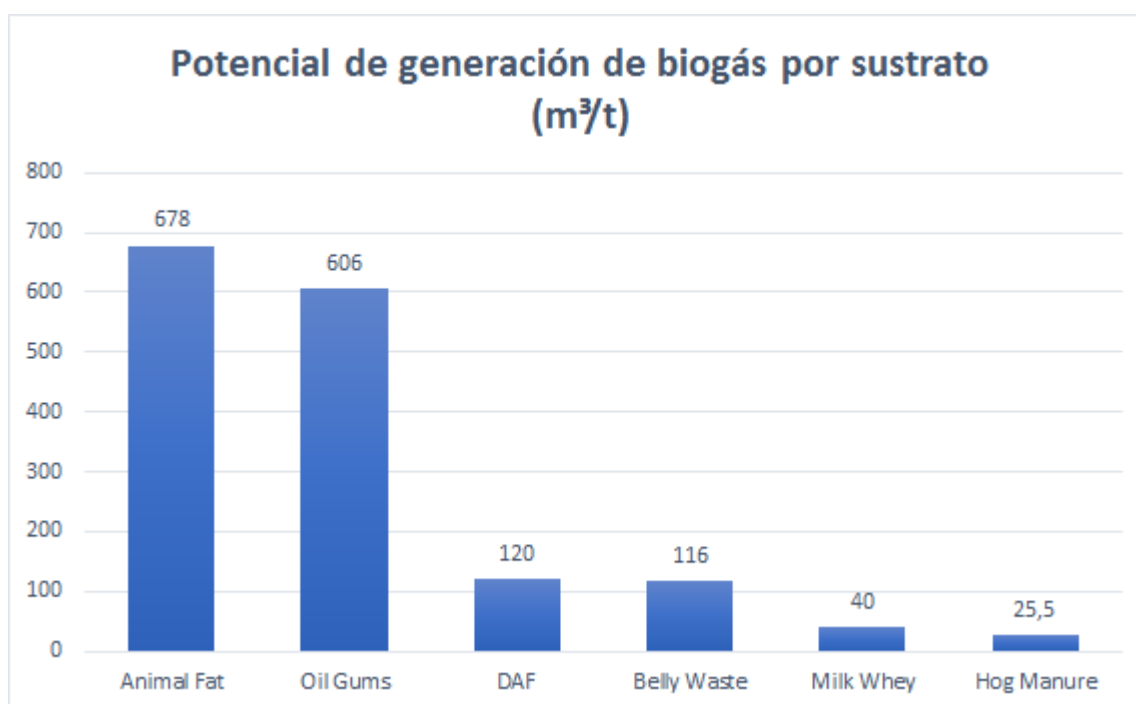


Gráfico 4: Potenciales individuales de generación de biogás para los sustratos.
Fuente: Cleanergy (Adaptado).

El análisis del Gráfico 4 permite percibir la diferencia de escala que hay entre las materias primas orgánicas para la planta de biogás. Se puede observar que el suero de leche, por ejemplo, tiene un potencial casi 16 veces menor que las gomas vegetales y grasas animales.

Sin embargo, hay que señalar que el potencial sólo no debe ser tomado como el único parámetro para evaluación del proyecto, pues, como se va a trabajar con una mezcla, las proporciones y los volúmenes mezclados de cada sustrato afectarán directamente su rendimiento. En un ejemplo de fácil entendimiento, una mezcla de 10 toneladas, siendo 9 suero de leche y una de gomas vegetales probablemente tenga un rendimiento mucho menor que una mezcla del mismo volumen de 9 toneladas de gomas vegetales y una de suero de leche.

Conociendo los potenciales de rendimiento individual, para el caso de la planta de biogás Villa del Rosario I, es necesario determinar el potencial total para toda la mezcla. Como los sustratos son mezclados en distintos volúmenes y proporciones, el rendimiento final de la mezcla es afectado directamente por estas cantidades.

Por esto, además de los rendimientos individuales, se debe tener en cuenta las cantidades suministradas de cada residuo orgánico que van a ser mezcladas. Las cantidades diarias de los sustratos que la planta Villa del Rosario I fue proyectada para recibir pueden ser observadas en la Tabla 3, y, para fines de un análisis más claro, la participación sobre el volumen total diario es presentada en el Gráfico 5.

Sustrato	Cantidad (t/día)
Milk Whey	75
Oil Gums	1
Animal Fat	7
Belly Waste	2
DAF	1
Hog Manure	40
Total:	126

Tabla 3: Suministro diario de residuos orgánicos por tipo de sustrato.
Fuente: Cleanergy (Adaptado).

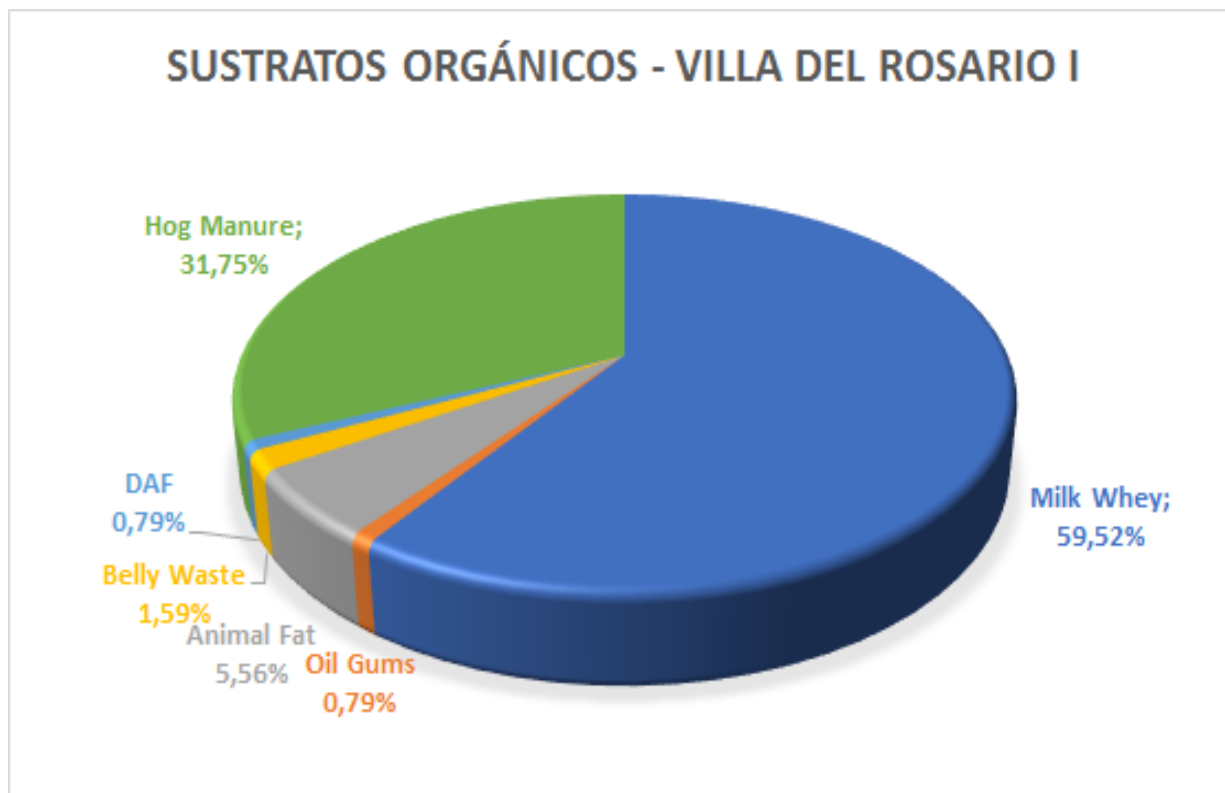


Gráfico 5: Composición del total diario suministrado.
Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar, la mayor parte del volumen diario suministrado es suero de leche (casi 60% del total), seguido por el estiércol porcino (cerca de 32%), que juntos representan más de 90% del total de residuos orgánicos que suministran la planta. Todos los otros sustratos (grasas DAF, gomas vegetales, grasas animales y sebos de estómago animal), desde el punto de vista de volúmenes, representan juntos menos de 10% del total diario para el funcionamiento de la planta.

Se puede señalar, de antemano, que un punto interesante cuando comparamos los gráficos 4 y 5 es que los sustratos que hay en mayor volumen (según el Gráfico 5) son los que tienen los potenciales de rendimiento más bajos (según el Gráfico 4). Esto es un aspecto importante a tener en cuenta para decisiones, pues para buscar mayor generación, por ejemplo, la empresa tiene dos opciones: dependiendo de la capacidad máxima del digestor, agregar más cantidades de sustratos sin importar su rendimiento o agregar sustratos de mayor rendimiento en cantidades menores, mejorando la eficiencia de la mezcla. De cualquier manera, los dos puntos son relevantes para analizar el rendimiento real de la mezcla en las condiciones determinadas por el proyecto.

Así, conociendo los volúmenes disponibles y los potenciales de rendimiento de cada sustrato, se puede evaluar las mezclas en términos de generación de biogás. Multiplicando la cantidad diaria disponible en toneladas por el potencial de generación de cada uno de los sustratos (m^3 biogás/tonelada), se puede estimar el potencial total que puede ser generado por la mezcla sumando los resultados. La Tabla 4 presenta dichos valores.

Sustrato	Generación biogás ($\text{m}^3/\text{día}$)
Animal Fat	4746
Milk Whey	3000
Hog Manure	1020
Oil Gums	606
Belly Waste	232
DAF	120
Total:	9724

Tabla 4: Estimación de generación de biogás desde la mezcla.
Fuente: Cleanergy (Adaptado).

Como se puede observar, los rendimientos son variados, la diferencia entre los potenciales de generación totales para cada sustrato, teniendo en cuenta su cantidad y su rendimiento individual, puede llevar a algunas conclusiones sobre cuáles son más o menos relevantes para el proyecto en cuestión. Sin embargo, mirando solamente los números, es difícil tener idea de la dimensión que cada uno de los datos asume en este caso. Para así aclarar esto de manera simple, el Gráfico de Pareto es la herramienta ideal para visualizar las relevancias, como se puede observar en el Gráfico 6.

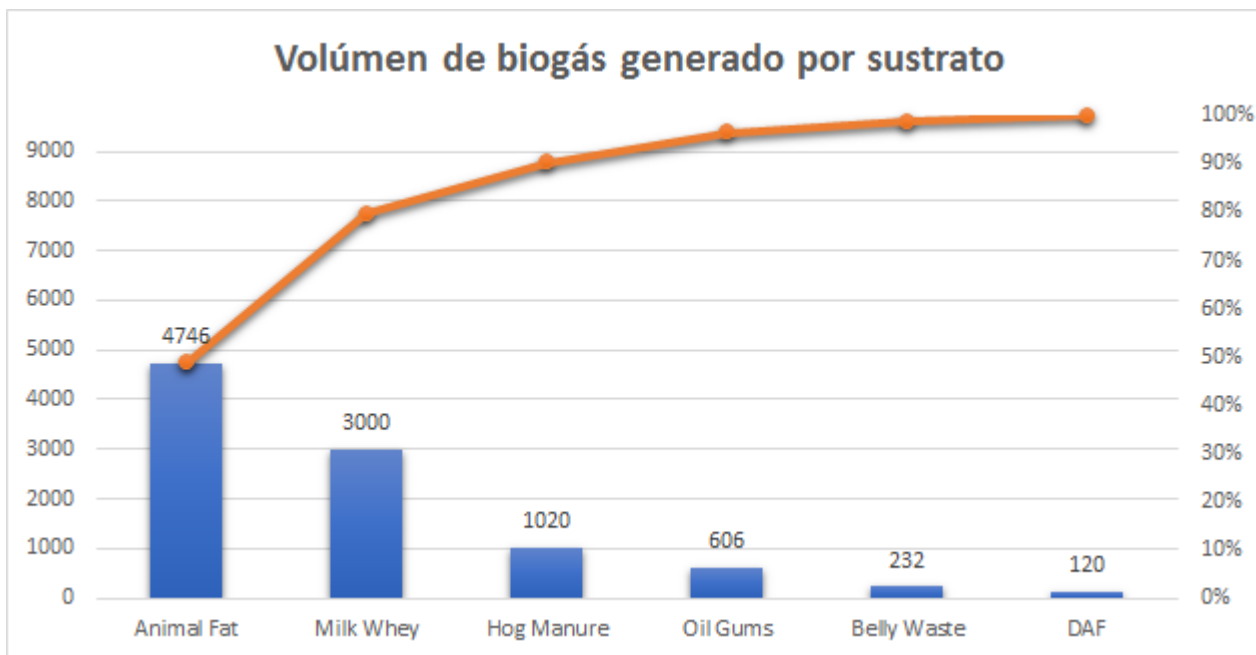


Gráfico 6: Rendimiento por sustrato para el volumen total de biogás generado.

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede percibir en el Gráfico 6, de los 9724m³ de biogás estimados para la generación diaria, 80% son generados por las grasas animales y el suero de leche que contiene la mezcla. Así, el principio de Pareto se aplica con fidelidad al análisis propuesto, pues menos de 20% de los tipos de sustratos del proyecto son responsables por 80% de la generación de biogás de la planta proyectada.

El Gráfico 6 si puede ser una buena herramienta para tomar decisiones respecto a posibles alteraciones en la mezcla o en los volúmenes para escenarios futuros, pues él incorpora los potenciales individuales de generación y las cantidades de cada sustrato en la mezcla, así, cualquier variación en dichos parámetros afecta directamente el rendimiento final.

Los sustratos pueden ser mezclados de varias maneras y proporciones. Puede haber ventajas y desventajas de trabajar con determinados tipos de mezclas. Una mezcla que tiene mayoritariamente en su composición un sustrato de alto rendimiento puede tener su logística más facilitada por necesitar menos tipos y volúmenes menores de otros residuos. Sin embargo, la misma tendrá una fuerte dependencia del suministro de este sustrato, quedándose sujeta a verse directamente afectada por eventuales problemas de suministro.

En contrapartida, una mezcla con una distribución más uniforme y equilibrada de volúmenes y tipos de residuos iba sufrir un efecto menor ante una situación así, pero necesitaría una mayor estructura logística, equipos e instalaciones de mayor capacidad y por consecuencia tendría costos más elevados. Por esto, la base para decisiones así es como trabajar en la composición de la mezcla según los objetivos que sean más adecuados a la realidad del funcionamiento de la planta de biogás.

De acuerdo con las cantidades y potenciales determinados, el volumen total diario de biogás que la planta fue proyectada para generar es de cerca de 9724 m³. Este dato, obtenido por la suma de los volúmenes generados individualmente por cada sustrato, es una referencia para el proyecto y no quiere decir que la generación va a seguir siempre exactamente este volumen.

Hay que tener en cuenta que muchos otros factores influyen en el rendimiento del proceso, como la temperatura, el pH, las condiciones de hidrólisis (pre-tratamiento) de los sustratos, etc. Con esto, se puede esperar, en promedio, un volumen generado entre 9700 y 9750 m³ diarios, considerando un intervalo de confianza aceptable para la estimación.

Sin embargo, hasta el momento, hablamos solamente de biogás. El próximo punto a ser analizado es, más allá del volumen generado, su conversión en energía eléctrica, que es el principal objetivo de la planta: generación de energía renovable a partir del biogás. Hay una serie de estudios que analizan la conversión de biogás en energía y las condiciones que afectan dicha transformación.

Hay actualmente una serie de tecnologías para hacer la conversión energética del biogás. En este proceso, la energía química que hay en sus moléculas es transformada en energía mecánica por una combustión controlada. Entonces, esta energía mecánica activa un alternador que la convierte en energía eléctrica. Las formas más utilizadas actualmente para la conversión son las turbinas a gas, que pueden ser pequeñas (hasta 100 kW), o grandes (hasta 300 MW), y los motores de combustión interna del tipo ciclo Otto o diésel. Algunos factores que determinan la cantidad generada de energía son, por ejemplo: el poder calorífico del biogás, la concentración de metano, el rendimiento del motor que hace la conversión (ciclo Otto o diésel) y el rendimiento del generador.

No hay un único valor de referencia que se puede adoptar como estándar para la conversión, pues cada proceso tiene sus particularidades y restricciones. Normalmente, para efectos de cálculo y estimaciones, se adopta entre 1,8 y 2,5 kWh de energía

generados por metro cúbico de biogás. Así, en una hipótesis muy optimista, bajo condiciones ideales, la energía generada por la planta Villa del Rosario I sería cerca de 25 MWh por día, tomando el volumen máximo generado de 9750 m³ y la tasa de conversión de 2,5 kWh/m³. En una realidad más probable, si hacemos el cálculo tomando el promedio de los intervalos presentados para los dos valores, tendríamos una generación cercana a 20 MWh diarios.

Este análisis permite estimar la capacidad de generación de energía en base a los volúmenes y mezclas de sustratos considerados para el proyecto. Originalmente, la planta de biogás fue proyectada para generar diariamente 20 MWh de energía. Se puede percibir que, con la mezcla y el suministro de residuos orgánicos actuales, su funcionamiento debe ser críticamente monitoreado, pues el volumen generado de biogás no es suficiente para generar dicha cantidad de energía, y a su vez considerando condiciones ideales de funcionamiento, lo que en la práctica no siempre ocurre.

Además, hay que señalar que la planta Villa del Rosario I, con sus respectivos equipos anteriormente descritos, según el proyecto de Cleanergy, consume aproximadamente un 7% del volumen energético generado para su propio funcionamiento. Así, según los análisis hechos, una recomendación sería buscar alternativas para aumentar la generación del biogás, mejorando por ejemplo la composición de la mezcla con sustratos de mayor rendimiento.

Además, trabajando con un margen de contingencia, la planta puede cumplir con los objetivos para los cuales fue proyectada, tener un funcionamiento asegurado por el consumo de la propia energía generada y también lograr mayor seguridad respecto a continuidad de su funcionamiento (teniendo en cuenta que la digestión anaeróbica es un proceso siempre continuo) ante eventuales fallas o hechos inesperados que pueden afectar el suministro de residuos orgánicos y comprometer el volumen generado. Esto se desarrolla más adelante en los capítulos “Sustentabilidad” y “Escenarios”.

4.2. Empresas Proveedoras

El proyecto de Cleanergy cuenta con una serie de empresas proveedoras para la planta que se quiere instalar. Algunas están ubicadas en regiones más cercanas. Existen distintos sectores de actividad, lo que logra una buena variedad de residuos orgánicos para

la mezcla completa del biodigestor. En principio, el proyecto cuenta con siete empresas para suministrar sus residuos orgánicos (incluyendo CROPS), que son:

- BIOSOYA: Ubicada en Villa del Rosario, la agroindustria trabaja con expeler y aceite de soja, asesoramiento agrícola y ganadero, laboratorio de granos, semillas e insumos. En el proyecto, la empresa suministra gomas vegetales en estado sólido para la mezcla de residuos orgánicos;
- CARNICEROS ASOCIADOS: Este establecimiento se dedica a la matanza y procesamiento de carne de ganado bovino y porcino, también ubicado en Villa del Rosario que en el proyecto suministrará residuos de estómagos bovinos, sebo y grasas animales de decantación, en estado sólido;
- COMECHINGONES: Quesería proveedora de suero de leche en estado líquido ubicada en Río Primero;
- CROPS: Es la principal proveedora del proyecto, ubicada en las cercanías de Villa del Rosario, el criadero va a suministrar grandes volúmenes de purines de cerdo en estado sólido;
- DON SANTIAGO: Ubicada en la región de Calchín, la empresa empezó como tambero y hoy trabaja con producción láctea, especialmente quesos. El sustrato para la planta de biogás es el suero de leche líquido generado como subproducto de su producción;
- LA LACTEO: Con su ubicación en Villa del Rosario, la empresa de laticinios (fábrica de quesos) hace parte del proyecto como proveedora de suero de leche, en estado líquido, y grasas DAF, en estado sólido.
- LÍNEA DORADA: Productora de quesos y productos lácteos, la empresa está ubicada en las cercanías de Cañada de Machado, en la ruta provincial 10 que conecta Villa del Rosario y Río Primero. Sus sustratos suministrados son de dos tipos: suero de leche, en estado líquido, y estiércol bovino, en estado sólido.

Sin embargo, teniendo en cuenta la dimensión del proyecto de la planta de biogás y cómo ella puede afectar la economía y el desarrollo de la región de forma positiva, y considerando que el presente trabajo tiene intención de contribuir con el desarrollo del proyecto, más adelante se presentan algunas otras empresas ubicadas en la región que también podrían incorporarse como proveedoras para la planta Villa del Rosario I. Dichas empresas no hacen parte del proyecto actualmente, pero algunas pueden tener grandes

volúmenes y sustratos de buen rendimiento para la producción de biogás, así que pueden ser consideradas buenas candidatas para sumarse al listado de proveedores actuales.

Esto generaría una serie de ventajas para ambas partes. Por un lado, la planta de biogás tendría una mayor oferta de sustratos y en mayores cantidades para su funcionamiento, garantizando así una mezcla completa más eficiente y diversificada, por ende, mayores rendimientos. Por el otro lado, las empresas tendrán una destinación limpia, adecuada y eficiente para sus residuos orgánicos al sumarse al proyecto, contribuyendo para su desarrollo sustentable y siguiendo políticas ambientales. Cleanergy, a su vez, entregará certificados de disposición final para que las empresas puedan acceder a los beneficios de ser categorizadas como “empresas verdes”.

La búsqueda de proveedores potenciales fue hecha de dos maneras. Primero, se realizó una búsqueda virtual por el Google Maps, recorriendo la región, y también por asociaciones y órganos administrativos que disponen de informaciones sobre las empresas que trabajan o tienen convenios. En seguida, se buscó información de campo, contactando con personas que conocen la región y sus establecimientos.

De las empresas encontradas, algunas disponen de mayor información que otras. Al momento de evaluar si la empresa puede ser relevante para el proyecto, hay que tener en cuenta básicamente tres aspectos:

- Su actividad industrial, que se supone que debe ser generadora de residuos orgánicos para alimentar la planta de biogás;
- Dimensión y producción, ya que hay que operar en condiciones de continuidad para establecerse como proveedora para la planta;
- Distancia y ubicación, pues empresas muy lejanas pueden inviabilizar su suministro debido al costo de transporte asociado al sustrato. Lo ideal sería que esté ubicada en un radio de hasta 50 km desde el emplazamiento de la planta, salvo casos excepcionales.

Con el fin de una mejor organización y ordenamiento, procederemos con la clasificación de las empresas y organizaciones en 3 categorías, dependiendo de los niveles de producción y la relevancia o relación que estas presentan con el proyecto. A continuación se detallan las empresas en cuestión y sus respectivas categorías.

4.2.1. Categoría 1: Proveedores actuales del proyecto

Esta categoría es exclusiva para las empresas que participan actualmente, es decir, aquellas que hacen parte del proyecto y firmaron las primeras ofertas de sustrato. Estas empresas se caracterizan por tener grandes volúmenes de residuos generados que pueden alimentar el biodigestor. Las siete empresas de esta categoría son las mencionadas en el primero momento, que pueden ser observados en la Tabla 5.

EMPRESA PROVEEDORA	UBICACIÓN	SUSTRATO
BioSoya	Villa del Rosario	Gomas vegetales
Carniceros Asociados	Villa del Rosario	Sebo y grasas animales
Comechingones	Río Primero	Suero de leche
CROPS	Villa del Rosario	Purines de cerdo
Don Santiago	Calchín	Suero de leche
La Lacteo	Villa del Rosario	Suero de leche y grasas DAF
Línea Dorada	Cañada de Machado	Suero de leche y estiércol bovino

Tabla 5: Proveedores actuales del proyecto Villa del Rosario I (Categoría 1).

Fuente: Elaboración propia.

4.2.2. Categoría 2: Proveedores potenciales

En esta categoría entran empresas de grandes volúmenes de producción ubicadas en regiones cercanas que no entraron en la oferta de sustratos original. Sin embargo, pueden ser potenciales proveedores a tener en cuenta para incorporar con el tiempo, ya que tienen grandes volúmenes de residuos generados y/o sustratos de buen rendimiento de biogás. La propuesta de esta categoría en la clasificación es presentar empresas que pueden sumarse a las proveedoras de categoría 1, garantizando así una mayor oferta de sustratos para que el biodigestor opere siempre en buenos niveles de rendimiento. La Tabla 6 presenta dichas empresas, así como el sustrato que pueden suministrar a la planta de biogás.

UBICACIÓN	EMPRESA	SUSTRATO
Villa del Rosario	La Coruña	Suero de Leche
Villa del Rosario	Cloacas	Barros cloacales
Villa del Rosario	Chiappero	Suero de leche
Toledo	Frigorifico Novara	Sebo y grasas animales
Rio Segundo	Georgalos	Orgánicos
Rio Segundo	Biodiesel Pilar S.A.	Expeller y aceite de soja
Pilar	La Nueva	Suero de Leche
Oncativo	Ovoco SA	Huevos
Las Junturas	Maglione Hnos y Cia	Granos oleaginosa
Las Junturas	Agroleaginosas	Borra
El Tío	Valora	Soja
Colonia Caroya	Frigorifico Qualitá	Grasas animales
Calchin Oeste	Frigorifico Vottero Peralta	Sebo y grasas animales

Tabla 6: Proveedores potenciales (Categoría 2).
Fuente: Elaboración propia.

Además de las empresas mencionadas arriba, una fuente proveedora más que puede ser incorporada al proyecto en los próximos años es el suministro de la fracción orgánica de los RSU de los municipios de Villa del Rosario, Luque, Costa Sacarte y Rincón, que también tienen potencial para la codigestión en el biodigestor de la planta de biogás. Sin embargo, como actualmente la basura no es separada y su recolección no es estructurada para una destinación así, por ahora no se toman los residuos orgánicos urbanos como sustrato para la planta Villa del Rosario I.

4.2.3. Categoría 3: Proveedores de contingencia

La categoría 3 es la categoría con menor grado de relevancia para el proyecto, principalmente por el tamaño de las empresas que contiene y los niveles de producción que maneja. En un lapso de 20 años, existe una alta probabilidad de que actuales proveedores dejen de existir o de que simplemente no se pueda contar con sus suministros. Así, es fundamental que la planta de biogás trabaje con un plan de contingencia para sus operaciones, y es ahí donde las empresas de esta categoría pueden hacer parte. En estos casos no se cuentan con los volúmenes específicos de producción. Es de consideración a tener en cuenta ya que a lo largo de 20 años muchas de estas

empresas pueden entrar en vías de crecimiento, convirtiéndose en potenciales proveedores para Cleanergy. La Tabla 7 presenta las empresas de categoría 3.

EMPRESA PROVEEDORA	UBICACIÓN	SUSTRATO
ACA	Villa del Rosario	Residuos de granos
AFA	Rio Segundo	Residuos de granos
Agroempresa Colon SA	Rio Primero	Residuos de granos
Agroinsumos Cordoba	Rio Primero	Residuos de granos
Cervecería Rio Segundo	Rio Segundo	Residuos orgánicos de producción de cerveza
Distribuidora Royjo S.R.L	Rio Segundo	Residuos de granos
Garino Cereales	Matorrales	Residuos de granos
Molino Agrícola	Rio Segundo	Residuos de granos y harina
Molino Harinero	Laguna Larga	Residuos de granos y harina
Molino las Junturas	Las Junturas	Residuos de granos y harina
Molinos Rio Segundo	Rio Segundo	Residuos de granos y harina
Molinos Viada S.A.	Villa del Rosario	Residuos de granos y harina
Yercobich	Villa del Rosario	Residuos lácteos

Tabla 7: Proveedores de contingencia (Categoría 3).

Fuente: Elaboración propia.

Bajo esta premisa se entiende que también pueden nacer nuevas empresas y otras desaparecer, por ello, se debe destacar que el estudio de proveedores debe ser un análisis continuo, siempre actualizado e incorporando nuevas oportunidades para el proyecto.

4.3. Logística del proyecto

El análisis logístico tendrá en cuenta dos aspectos principales de la relación proveedor-planta biogás de Cleanergy: el enrutamiento y los volúmenes de sustrato que deben ser transportados.

La cuestión del enrutamiento, en el caso de CROPS y algunos otros proveedores, tiene la particularidad que algunos caminos de acceso no cuentan con pavimentación asfáltica, son vías de tierra. Esto debe ser considerado en el análisis que se hace por el hecho de que, en un día de malas condiciones climáticas (lluvia y vientos, por ejemplo), es probable que el acceso ofrezca dificultades y restricciones para que pasen los camiones.

El objetivo de este análisis es determinar cuál es el mejor camino (ruta) para hacer el transporte de los sustratos que va a necesitar la planta de biogás. Teniendo en cuenta que los principales proveedores que van suministrar el biodigestor son los de categoría 1, el objeto de estudio está en la logística que hay entre ellos y la planta Villa del Rosario I, ubicada al lado de CROPS. Los demás proveedores todavía no son considerados para este análisis por el hecho de no haber informaciones detalladas sobre los mismos y pertenecen a categorías de contingencia para suministrar el biodigestor.

Teniendo la ubicación de las empresas en base a sus coordenadas geográficas, es posible tener una idea de cuáles son las que están más lejos o más cerca de donde se instalará la planta de biogás. Hay que considerar que, en este caso, las distancias en línea recta no representan con fidelidad el camino tomado entre las empresas, pues las autopistas y rutas no son lineales y tienen que pasar por otros puntos que pueden representar desviaciones en relación al destino considerado. Sin embargo, ellas aún son utilizadas para la representación gráfica del problema.

Hay también que incorporar en el estudio el hecho de que hay sustratos sólidos y líquidos. Así, se puede hacer una separación por estado físico, para que en los camiones de recolección se pueda mezclar solamente sustratos del mismo tipo y no afectar la composición final de la mezcla que va alimentar la planta de biogás.

En la logística, el problema de enrutamiento puede ser tratado a través de distintas maneras. Hay métodos exactos, softwares complejos, heurísticas constructivas y modelos matemáticos para determinación de rutas, además de otras formas. Normalmente son problemas complicados para alcanzar la solución óptima, pues su complejidad es grande cuando hay muchos puntos y posibilidades de ruta.

De manera general, algunos principios básicos para elaboración de un buen enrutamiento son:

- Cargar los vehículos con volúmenes destinados a paradas más cercanas entre sí. Las paradas de cada camión deben estar cerca para minimizar las distancias y los tiempos de tránsito.
- Paradas deben ser combinadas para dejar los agrupamientos más densos y evitar su superposición.
- Empezar los itinerarios por la parada más lejana del punto de origen, haciendo la ruta de manera que la mayor parte de la capacidad del vehículo sea utilizada.

- Buscar formar estándares de gota, evitando superposiciones y cruzamientos entre las rutas.
- Itinerarios más eficientes son los que utilizan los mayores vehículos disponibles, capaces de atender más paradas.
- Puntos aislados de un agrupamiento son buenos candidatos para medios alternativos o terceros.

Teniendo en cuenta estos principios y las distintas maneras para elaboración del problema, la cuestión es elegir la mejor manera para determinar el camino que el camión va a hacer. Como en el problema en cuestión el número de empresas no es demasiado grande, se puede buscar directamente una solución óptima, es decir, en este caso, la ruta que tenga la menor distancia total a recorrer.

Para eso, una buena opción es el modelo matemático clásico en la investigación operativa: el problema del viajante de comercio (TSP - Traveling Salesman Problem). En una breve contextualización, la situación del problema es la de un viajante que busca recorrer una serie de ciudades o puntos para vender sus productos y quiere saber cuál es el camino que debe tomar, o sea, la secuencia de puntos que componen su ruta. El modelaje matemático de este problema busca encontrar la menor distancia total recorrida que pase por todos los puntos del grafo que representa el problema, que es la solución óptima.

El problema, sin embargo, exige una gran complejidad y esfuerzo computacional cuando el número de puntos para visitar es grande (complejidad NP-difícil), pues el modelo prueba todas las combinaciones posibles (que crecen de manera factorial) para estar seguro que la solución encontrada es la menor posible. En el caso de los proveedores del biodigestor, una vez que no son muchos, el modelo nos sirve perfectamente para determinar la ruta que resulta en la menor distancia total. El modelo tiene buena eficiencia para problemas chicos, pues asegura la solución óptima.

Teniendo en cuenta la ubicación de cada una de las empresas en el mapa por sus coordenadas, se puede obtener una estimativa de las distancias de ruta entre ellas por el Google Maps. Las empresas de categoría uno están ubicadas en el mapa abajo. Sin embargo, como Comechingones, Línea Dorada y Don Santiago son más lejanas de Villa del Rosario, en la Imagen 9 se puede observar de manera ampliada las otras más cercanas de CROPS:



Imagen 9: Ubicación de las empresas proveedoras.
Fuente: Elaboración propia (Google Maps).

Para determinar las distancias y los caminos a recorrer, una vez que las empresas ya están ubicadas en el mapa, solamente hay que buscar por el Google Maps la ruta entre dos puntos. Por ejemplo, teniendo la ubicación de las empresas Carniceros Asociados y CROPS, se puede buscar la ruta para conectarlas y saber la distancia total recorrida, que, en este caso, es cerca de 8 km, como muestra la Imagen 10:

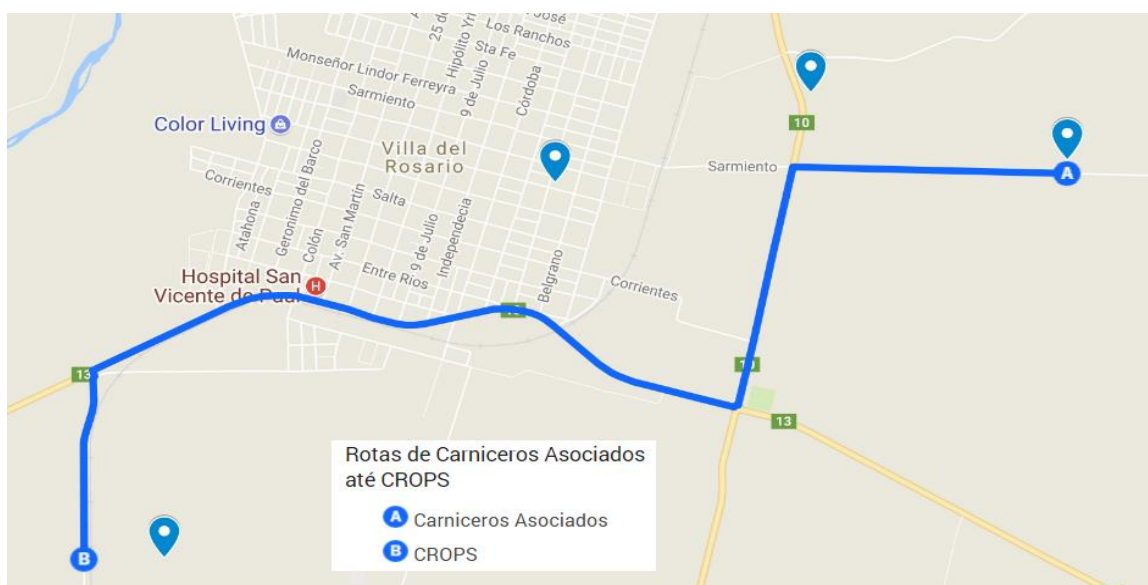


Imagen 10: Ejemplo de ruta desde Carniceros Asociados (proveedor) hacia CROPS (al lado de la planta).
Fuente: Elaboración propia (Google Maps).

Así, conociendo la ubicación de los proveedores y los sustratos ofrecidos, el problema puede ser desarrollado separadamente para los sólidos y líquidos, pues los camiones que harán el transporte son distintos y la frecuencia de recolección también cambia de acuerdo con el estado físico del sustrato.

4.3.1. Logística de los sustratos líquidos

Todos los sustratos líquidos del proyecto son suero de leche, lo que permite mezclarlos directamente en el camión tanque sin afectar su calidad y propiedades físicas/químicas. Los proveedores de suero de leche del proyecto son los presentados en la Tabla 8.

Empresa Proveedora	Dist to CROPS (km)	Volúmen (m ³ /día)
Línea Dorada	20	15
Don Santiago	44	30
Comechingones	35	20
La Lacteo	4	10

Tabla 8: Proveedores de suero de leche.
Fuente: Elaboración propia.

Para hacer la representación del problema, se pueden tomar las distancias entre las empresas y utilizar un grafo de aristas no direccionadas. En este caso, hay que incluir CROPS como un punto más, representando la ubicación de la planta Villa del Rosario I. Para esto, se asume que el camino de acceso no tiene variaciones en el trayecto de ida y vuelta, es decir, la distancia recorrida sigue siendo la misma.

La mejor estimativa de las distancias de ruta entre las empresas pueden ser obtenidas por el Google Maps, dónde se puede ubicarlas por sus coordenadas y buscar la ruta entre los puntos. Haciendo esto, tenemos los siguientes datos presentados en la Tabla 9.

DISTANCIAS (km)		Línea Dorada	Don Santiago	Comechingones	La Lacteo	CROPS
		1	2	3	4	6
Línea Dorada	1	0	53	16	15	20
Don Santiago	2	53	0	69	41	44
Comechingones	3	16	69	0	30	35
La Lacteo	4	15	41	30	0	4
CROPS	6	20	44	35	4	0

Tabla 9: Matriz de distancia entre los proveedores de sustratos líquidos.
Fuente: Elaboración propia.

Para dejar más evidente la formulación del problema, la tabla puede ser exhibida en la forma de un grafo no orientado (pues las distancias son las mismas, independiente del sentido) con los vértices representando las empresas (Imagen 11).

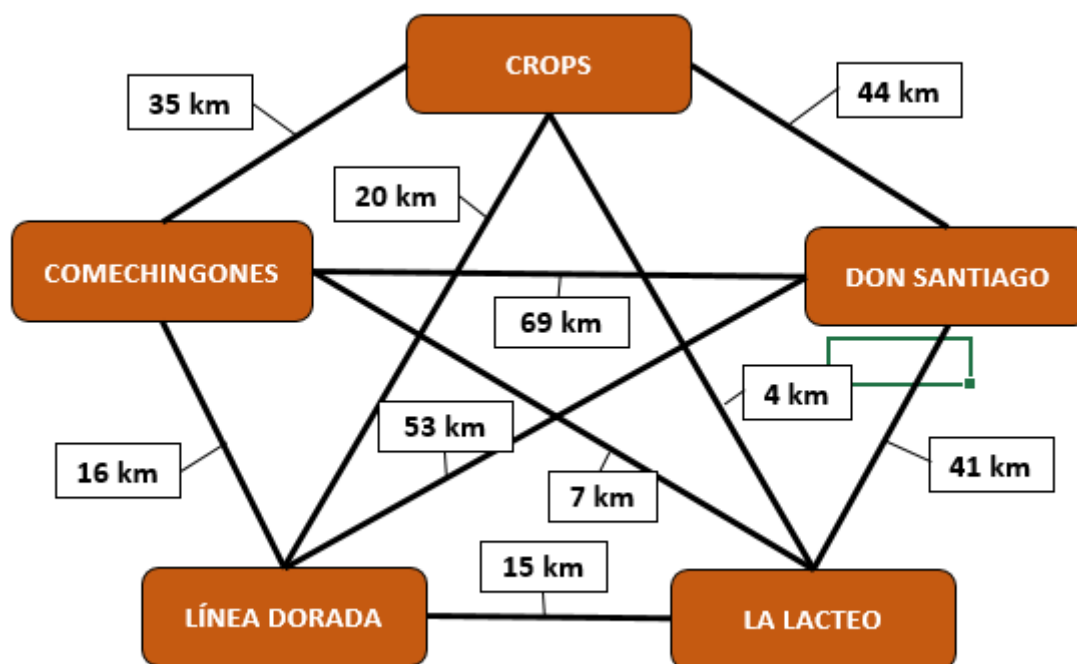


Imagen 11: Representación del problema para los sustratos líquidos.
Fuente: Elaboración propia.

De los modelos matemáticos conocidos para el problema del viajante de comercio, hay uno modelo propuesto por Miller, Tucker y Zemlin, 1960, que tiene un modelaje sencilla y práctica para implementación. Para el caso en cuestión, hay que hacer solamente una adaptación en los parámetros de datos, las restricciones y función objetivo no se alteran.

Para la implementación, el software utilizado es el LINGO versión 17.0, desarrollado por la empresa americana Lindo Systems. En el modelo original, se puede obtener directamente la ruta a partir de las coordenadas de los puntos, pues él hace el cálculo de las distancias lineales teniendo en cuenta el radio de la tierra y funciones trigonométricas para determinar la ubicación de los puntos y las distancias entre ellos.

Como las distancias lineales no sirven para representar con fidelidad la realidad del problema, se puede hacer una adaptación en el mismo modelo propuesto para insertar las distancias de ruta reales determinadas por el Google Maps en el lugar de las coordenadas de las empresas. Así, el problema alcanza una mayor precisión y se vuelve más fiel a la realidad contextual del trabajo. Las modificaciones que se hacen son sacar las funciones que hacen el cálculo de las distancias a partir de las coordenadas, así como sus parámetros y submodelos, y cambiar la sección "DATA" del modelo para insertar las distancias en kilómetros determinadas en el Google Maps.

El modelo queda considerablemente más sencillo en relación al original, la solución obtenida seguramente es más fiel con respecto a distancia real que el camión deberá recorrer. Además de esto, el esfuerzo computacional demandado y el tiempo de resolución también serán menores, pues el modelo no necesita hacer cálculos que no serán utilizados, ya que el Google Maps proporciona las distancias entre los puntos.

Para analizar la solución obtenida, hay que buscar las variables de decisión binarias que representan las conexiones entre las empresas. En este modelo, la variable $Z(i,j)$ tiene valor 1 cuando el camión parte del punto i (para la empresa i), directamente para el punto j , caso contrario, la variable asume el valor cero. Las abreviaciones para las empresas en este modelo son las siguientes: LD = Línea Dorada; DS = Don Santiago; CO = Comechingones; LL = La Lacteo, CR = CROPS (ubicación de la planta).

Así para buscar el circuito que representa la secuencia de puntos de la ruta obtenida, necesitamos solamente buscar las variables Z que tienen valor 1 en el Solution Report que el modelo nos muestra, en la Imagen 12:

Variable	Value	Reduced Cost
Z(LD, LD)	0.000000	0.000000
Z(LD, DS)	0.000000	0.000000
Z(LD, CO)	1.000000	0.000000
Z(LD, LL)	0.000000	0.000000
Z(LD, CR)	0.000000	0.000000
Z(DS, LD)	1.000000	0.000000
Z(DS, DS)	0.000000	0.000000
Z(DS, CO)	0.000000	0.000000
Z(DS, LL)	0.000000	0.000000
Z(DS, CR)	0.000000	0.000000
Z(CO, LD)	0.000000	0.000000
Z(CO, DS)	0.000000	0.000000
Z(CO, CO)	0.000000	0.000000
Z(CO, LL)	1.000000	0.000000
Z(CO, CR)	0.000000	0.000000
Z(LL, LD)	0.000000	0.000000
Z(LL, DS)	0.000000	0.000000
Z(LL, CO)	0.000000	0.000000
Z(LL, LL)	0.000000	0.000000
Z(LL, CR)	1.000000	0.000000
Z(CR, LD)	0.000000	0.000000
Z(CR, DS)	1.000000	0.000000
Z(CR, CO)	0.000000	0.000000
Z(CR, LL)	0.000000	0.000000
Z(CR, CR)	0.000000	0.000000

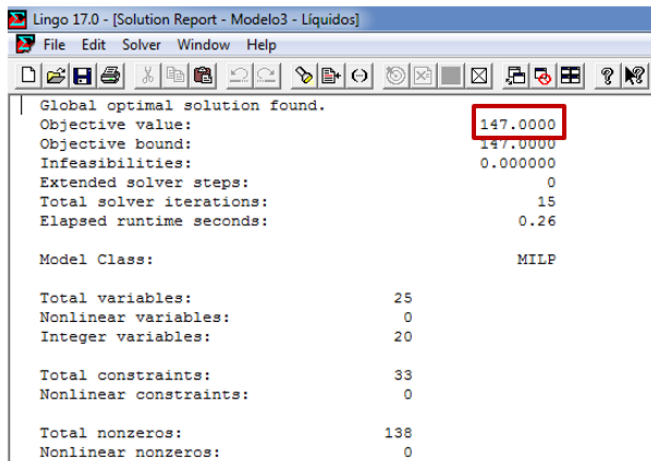


Imagen 12: Solución óptima del modelo matemático para la ruta de los sustratos líquidos.
Fuente: Elaboración propia.

Así, de acuerdo con el camino obtenido, la secuencia de ruta es: partiendo de la planta de biogás, al lado de CROPS, sigue para Don Santiago, después para Línea Dorada, Comechingones, La Lacteo y retorno al punto de partida. Con relación a la distancia total recorrida, el trayecto real tiene un total de 147 Km recorridos, según las distancias estimadas por el Google Maps.

La frecuencia de recolección de los sustratos sólidos debe ser diariamente, pues algunos proveedores de lácteos generan grandes cantidades diarias que necesitan la destinación adecuada diariamente por sus propiedades y volúmenes.

4.3.2. Logística de los sustratos sólidos

En el caso de los sustratos sólidos, la metodología es básicamente la misma. Hay que mencionar, sin embargo, que la frecuencia de recolección no necesita ser diaria, así que se puede programar los períodos para hacerla de acuerdo con la necesidad y la demanda de sustratos para el biodigestor. En este análisis, los proveedores son los siguientes (Tabla 10).

Empresa Proveedora	Dist to CROPS (km)	Vol. Sustrato sólido (ton/día)
BioSoya	20	1
Carnic Asociad	8	9
La Lacteo	4	1
CROPS	-	40

Tabla 10: Proveedores de los sustratos sólidos.

Fuente: Elaboración propia.

El modelo matemático que se va a utilizar es el mismo que fue adaptado para tomar las distancias obtenidas por el Google Maps. Una vez que ya se conoce la ubicación de las empresas y los caminos de acceso a cada una de ellas, el modelo simplemente va a determinar cuál es la secuencia con que se debe hacer el trayecto para que la distancia total recorrida sea la menor posible. Para los cuatro proveedores de sustratos sólidos, la Tabla 11 muestra las distancias tomadas para el modelo con base en las rutas diseñadas por el Google Maps.

DISTANCIAS (km)		BioSoya	Carnic Asociad	La Lacteo	CROPS
		1	2	3	4
BioSoya	1	0	2	2	7
Carnic Asociad	2	2	0	3	8
La Lacteo	3	2	3	0	4
CROPS	4	7	8	4	0

Tabla 11: Matriz de distancia entre los proveedores de sustratos sólidos.

Fuente: Elaboración propia.

Con estos datos, el grafo de representación del problema quedaría de la siguiente forma, como muestra la Imagen 13.

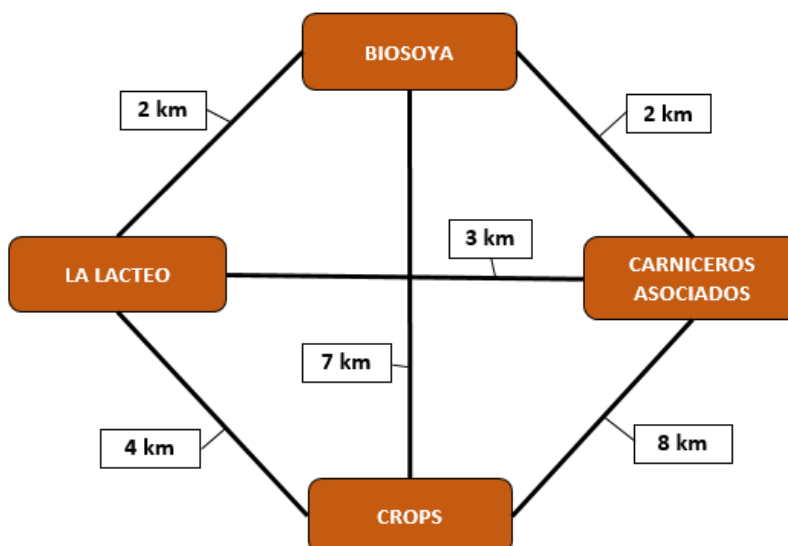


Imagen 13: Representación del problema para los sustratos sólidos.
Fuente: Elaboración propia.

Insertando la matriz de distancias en la sección Data del modelo implementado en el software y ordenando su ejecución, el Lingo trae el siguiente resultado en su Solution Report, presentado en la Imagen 14.

Variable	Value	Reduced Cost
Z (BS, BS)	0.000000	0.000000
Z (BS, CA)	1.000000	0.000000
Z (BS, LL)	0.000000	0.000000
Z (BS, CR)	0.000000	0.000000
Z (CA, BS)	0.000000	0.000000
Z (CA, CA)	0.000000	0.000000
Z (CA, LL)	1.000000	0.000000
Z (CA, CR)	0.000000	0.000000
Z (LL, BS)	0.000000	0.000000
Z (LL, CA)	0.000000	0.000000
Z (LL, LL)	0.000000	0.000000
Z (LL, CR)	1.000000	0.000000
Z (CR, BS)	1.000000	0.000000
Z (CR, CA)	0.000000	0.000000
Z (CR, LL)	0.000000	0.000000
Z (CR, CR)	0.000000	0.000000



Imagen 14: Solución óptima del modelo matemático para la ruta de los sustratos sólidos.
Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en el resultado, las variables que conectan las empresas que tienen valor 1 son las que forman el siguiente circuito: CROPS, BioSoya, Carniceros Asociados, La Lacteo y el retorno a la planta de biogás. La distancia total recorrida en esta ruta es de 16 km, tomando como referencia los caminos determinados en el Google Maps.

4.3.3. Volúmenes y recolección

Teniendo en cuenta las rutas óptimas y las distancias totales, y tomándose como referencia para una situación ideal, la restricción que debe ser incorporada al análisis logístico es la capacidad de los camiones de transporte.

Como algunas empresas están en regiones de difícil acceso, camiones muy grandes no son prácticos e incluso algunos no se pueden maniobrar en dichos espacios para los procedimientos de carga. Así, hay que trabajar con camiones de menor capacidad, de la manera más adecuada a los volúmenes que se van a recolecionar.

Para los sustratos líquidos, el volumen total de suero de leche suministrado es 75 m³, y la distancia óptima para la ruta de recolección es 147 km. Los camiones tanque más comunes para dicho transporte normalmente tienen capacidades de 30 o 40 mil litros. Así, considerando el volumen demandado, hay dos opciones: alquilar tres camiones de 30000 litros, totalizando una capacidad de 90 m³ transportados, o dos camiones de 40 m³, totalizando una capacidad de 80 m³. En la Imagen 15, se puede observar la representación de la ruta óptima y los puntos de recolección (empresas proveedoras).

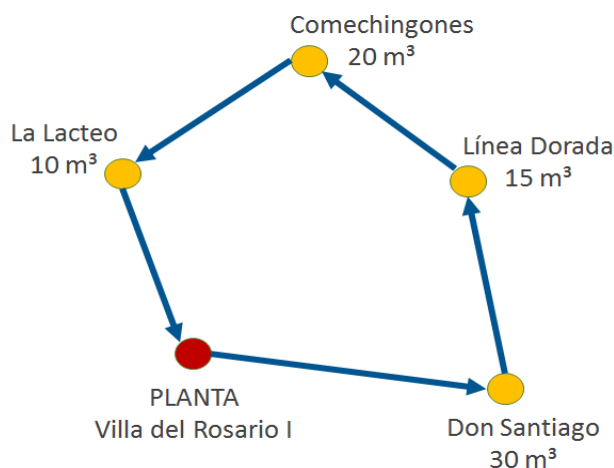


Imagen 15: Representación de la ruta óptima para los sustratos líquidos.

Fuente: Elaboración propia.

Trabajando con 3 camiones de 30 m³, la opción más adecuada a la recolección sería destinar uno a Don Santiago (que busca un volumen de 30 m³ que la empresa genera), otro haciendo la ruta desde la planta de biogás hacia Comechingones y La Lacteo (totalizando 30 m³ suministrados por las dos empresas), y el tercero a Línea Dorada

(buscando los 15 m³ restantes de suero de leche del proveedor). En la Imagen 16, se puede observar dicha representación. La distancia total recorrida sería, en esta opción, 197 km.

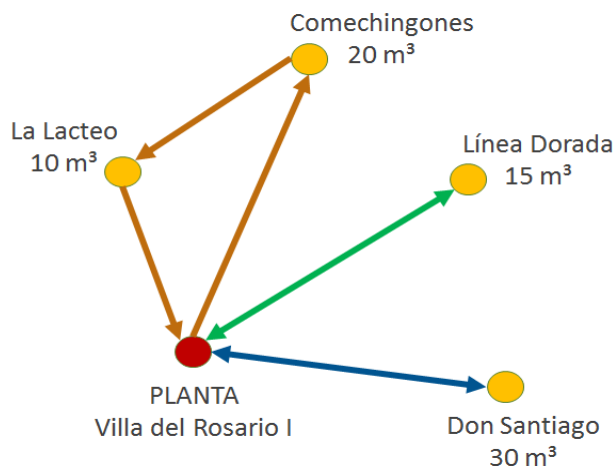


Imagen 16: Primera opción de recolección para los sustratos líquidos.
Fuente: Elaboración propia.

Tomando la opción 2, se trabajaría con dos camiones de 40000 litros de capacidad, y la mejor manera de manejarlos para la recolección sería encargar uno del trayecto Don Santiago y La Lácteo (que juntos totalizan un volumen de 40 m³), y destinar el otro a hacer la ruta Línea Dorada y Comechingones (que juntos suministran 35 m³ de suero). La distancia total recorrida sería, en ese caso, 160 km. En la Imagen 17, se puede observar dicha representación.

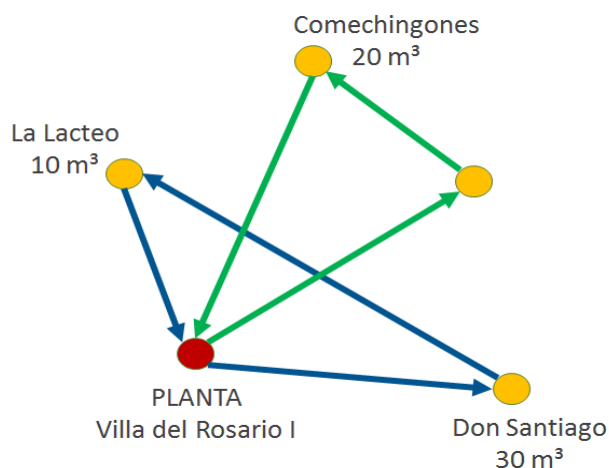


Imagen 17: Segunda opción de recolección para los sustratos líquidos.
Fuente: Elaboración propia.

Comparando las dos opciones, la opción 2 se muestra económicamente más viable y adecuada por cuenta de los siguientes hechos:

- Con una distancia total menor a ser recorrida, se supone que los costos variables de transporte (combustible, peajes, etc.) serán más bajos, pues son proporcionales a la distancia. La distancia total de la opción 2 es 13 km mayor que la distancia de la ruta óptima, adoptada como referencia para el análisis, mientras la opción 1 tiene una distancia total de 197 km, 50 km más que el valor ideal.
- Los costos fijos involucrados, especialmente el alquiler del camión, son menores para la opción 2, pues se alquilan dos camiones, mientras la opción 1 necesitaría 3 camiones para cubrir la recolección del mismo volumen.
- La capacidad ociosa también es considerada para el análisis. Con una capacidad total de 90 m³, la opción 1 dejaría 15 m³ sin utilizar, mientras en la opción 2 apenas 5 m³ no serían ocupados de los 80 m³ totales que caben en los dos camiones.

Así, el análisis logístico se concluye con la opción 2 siendo la mejor propuesta para la recolección de los sustratos líquidos del proyecto de Cleanergy. Para el caso de los sustratos sólidos, el total suministrado es de 11 toneladas. Para esto, un único camión puede hacer la recolección. Así, la ruta óptima encontrada por el programa puede ser recorrida sin restricciones de capacidad, totalizando 16 km para la recolección diaria. La Imagen 18 muestra su representación.

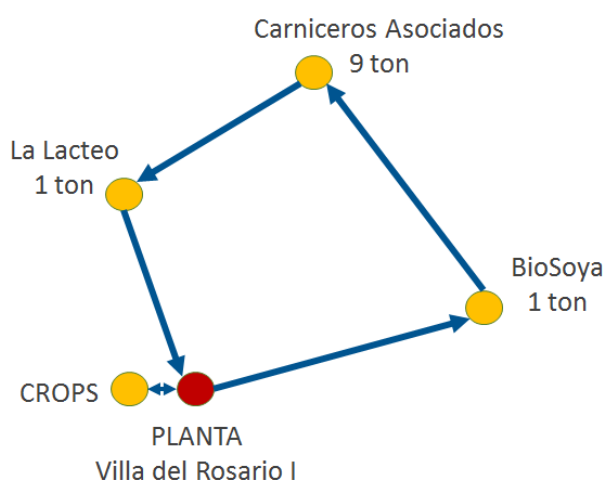


Imagen 18: Ruta de recolección de los sustratos sólidos.
Fuente: Elaboración propia.

4.4. Escenarios

La propuesta de trabajar con escenarios es desarrollar un análisis más amplio y completo para las condiciones de funcionamiento de la planta de biogás más allá de solo lo que fue proyectado. El proyecto Villa del Rosario I fue hecho con base en variables determinadas por Cleanergy que fueron adoptadas como referencia para su construcción. Sin embargo, por el hecho de que la generación de biogás se trata de un tema que todavía no se tiene una gran disponibilidad de fuentes teóricas, el nivel exactitud de los datos muchas veces se puede poner no muy alto.

Tomando los potenciales de generación de biogás, por ejemplo, para cada uno de los sustratos hay una tasa que fue adoptada para los cálculos, es decir, se supone que cada tonelada de determinado sustrato va a generar un determinado volumen de biogás. Sin embargo, el proceso de digestión anaeróbica es influenciado por una serie de variables más, ya descritas anteriormente, que pueden afectar dicho rendimiento. En escalas mayores, la propagación de la desviación relativa al valor referencia puede implicar en grandes variaciones para los rendimientos finales de la planta (energía y biogás).

Así, lo que se propone es trabajar con algunos intervalos de referencia para los valores adoptados, estableciendo como límites de variación razonables para dichos parámetros, y, con eso, estimar los posibles efectos sobre la generación final de energía.

El siguiente análisis probablemente no sea representativo, ya que nuestro estudio es lineal, y como ya se ha mencionado anteriormente, estos valores pueden variar en la práctica, para ser más exactos, en la actualidad no se cuenta con informaciones exactas suficientes para conocer por ejemplo las cantidades producidas de biogás (m^3/ton), en función de las composiciones y proporciones de sustratos que tiene la mezcla completa, pero sí se puede hacer un aproximado, ponderando cada sustrato de manera individual como ya se demostró anteriormente en el capítulo de sustratos. Esto es porque no existen aún dos plantas de biogás idénticas o que procesen exactamente las mismas mezclas en sus proporciones.

Para el estudio se plantean 3 escenarios posibles, uno realista, otro optimista y el pesimista. Los escenarios han sido construidos con suposiciones factibles de eventos que puedan ocurrir en un futuro próximo y que pueden afectar la cantidad de materia prima suministrada a la planta. Así, cada una de las empresas fue analizada individualmente ante

el contexto económico que se encuentra el país y condiciones externas o internas que pueden afectar su suministro de residuos para la planta de biogás. Las cantidades iniciales suministradas al proyecto (escenario base) fueran cambiadas con base en algunas suposiciones factibles para construcción de un escenario pesimista y un escenario optimista. Para esto, dos variables principales han sido consideradas: las cantidades suministradas de sustratos y el rendimiento del biogás producido para generación de energía, que son los que afectan directamente los resultados de la planta.

La primera de ellas es la variación de volumen de biogás generado por la mezcla de residuos orgánicos. Este coeficiente se ve directamente afectado por el peso en materia prima que llega a la planta. Algunas empresas, como La Lacteo por ejemplo, hoy se encuentran con grandes problemas financieros y deudas, por lo que en un escenario pesimista consideramos que no se puede contar con sus suministros. Para el caso de la industria agropecuaria, investigaciones llevadas a cabo por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) y otros organismos del ministerio de agroindustrial de la república Argentina, estiman grandes crecimiento y proyecciones hasta el año 2020.

En la Tabla 12 y el Gráfico 7, se visualizan las variaciones para cada escenario posible, considerando las situaciones económicas y financieras de cada empresa, como así también el desarrollo económico y de consumo del país, ya que se entiende que si una industria aumenta su producción, también lo hacen sus desechos y por ende la materia prima para la planta de biogás.

Empresa Proveedorora	Cantidad Diaria (ton) de Residuos Suministrada según los Escenarios		
	Pesimista	Base	Optimista
Línea Dorada	15	15	17
La Lacteo	0	10	10
Don Santiago	30	30	34
Comechingones	18	20	20
BioSoya	1	1	1
Carniceros Asociados	7	7	7
La Lacteo	0	1	1
CROPS	40	40	45
TOTAL	113	126	137

Tabla 12: Variación en las cantidades suministradas para construcción de los escenarios.

Fuente: Elaboración propia.



Gráfico 7: Representación de las cantidades suministradas para los tres escenarios propuestos.
Fuente: Elaboración propia

Con estos incrementos la planta tendría valores de generación de biogás que se ven en la Tabla 13:

Empresa Proveedorora	Generación total (m ³ biogás)		
	Pesimista	Base	Optimista
Linea Dorada	600	600	680
La Lacteo	0	400	400
Don Santiago	1200	1200	1360
Comechingones	720	800	800
BioSoya	606	606	606
Carniceros Asociados	4978	4978	4978
La Lacteo	0	120	120
CROPS	1020	1020	1147,5
TOTAL	9124	9724	10092

Tabla 13: Variación en el volumen diario generado de biogás para los escenarios propuestos.
Fuente: Elaboración propia.

La segunda variable analizada es la variación de la tasa de rendimiento del biogás para generación de energía. Este valor depende íntegramente de la composición química exacta del biogás, dado que es una información con la que no se cuenta. Hay estudios

sobre el tema en los cuáles los valores para esta tasa varían alrededor de 2 KWh generados por m³ de biogás.

Se procede considerando el valor más probable de los intervalos mencionados previamente de 1,8 KWh/m³, que fue el valor más bajo encontrado para dicho rendimiento, a 2,5 KWh/m³ de biogás, en una estimación más optimista, que en algunos proyectos ha sido verificada. Es decir, la conversión es hecha adoptándose una tasa referencia de 2 KWh/m³, que fue el valor utilizado por Cleanergy en el proyecto.

Así, haciendo la conversión de biogás en energía, las cantidades diarias generadas serían de 18,25 MWh, 19,45 MWh y 20,18 MWh en los escenarios pesimista, base y optimista, respectivamente. En el Gráfico 8, se puede observar la cantidad de energía y los volúmenes de biogás generados diariamente en un comparativo de los escenarios propuestos.

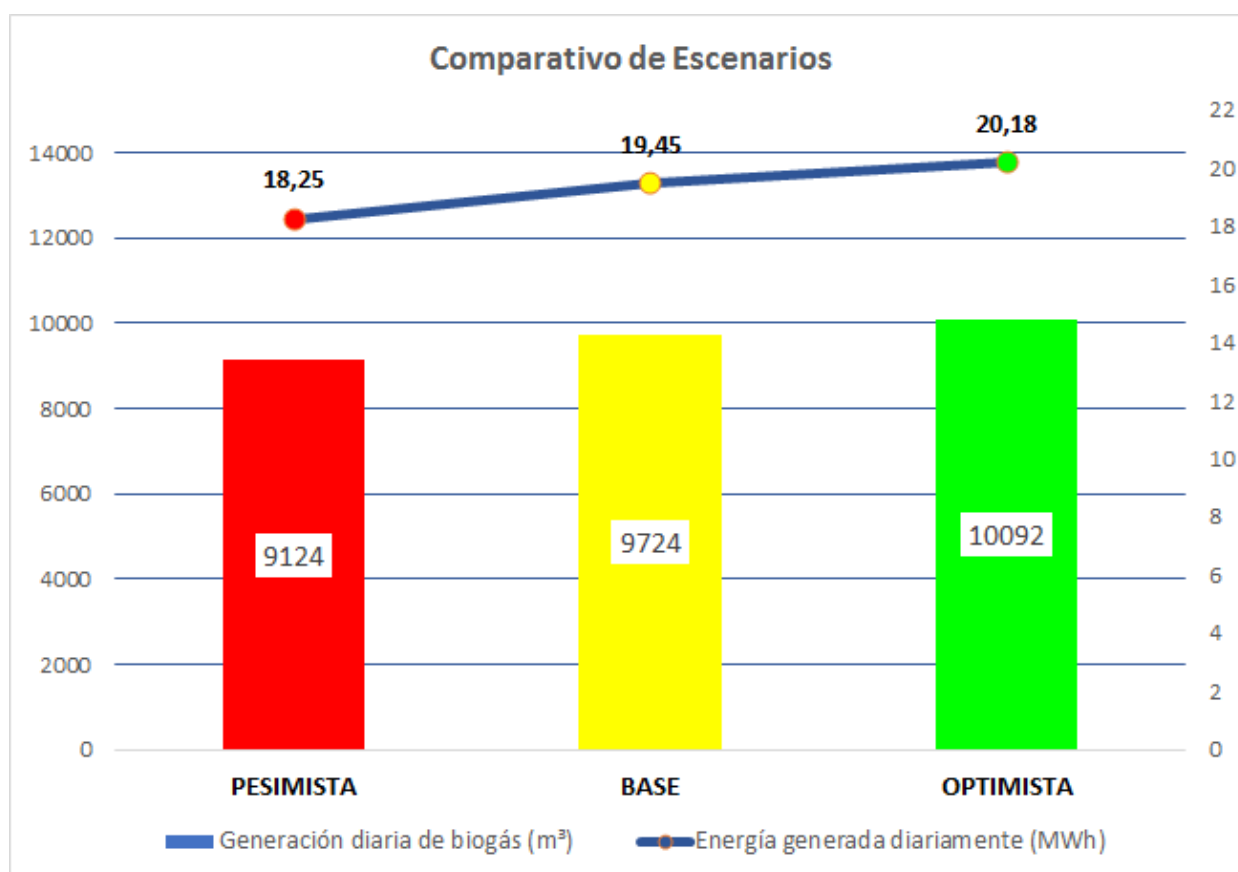


Gráfico 8: Comparativo de generación de energía y biogás para los escenarios propuestos.

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar, el intervalo final para generación diaria de la planta hecho con base en los cálculos propuestos tiene un valor mínimo de 18,25 MWh y máximo de 20,18 MWh. El escenario base determina el valor más probable en 19,45 MWh generados diariamente, si no hay cambios en las condiciones estimadas por Cleanergy cuando hice el proyecto. La variación encontrada es factible, representando, en porcentaje, 3,7% más en un escenario optimista y 6,1% en un escenario pesimista, con relación al valor de referencia.

Con este análisis, se puede tener una idea de la dimensión de posibles impactos en los resultados de la planta por cuenta de alteraciones en el suministro de sustratos. Si eventualmente la energía diaria generada escapa al intervalo propuesto, es probable que algún factor externo especial esté actuando sobre el proceso. Dentro del intervalo, se puede admitir que las variaciones son por cuenta de causas naturales, pues hay una serie de factores no exactos que pueden variar e influir en la mezcla, afectando los rendimientos del proceso y la generación de energía.

4.5 Sustentabilidad

El proyecto del biodigestor desarrollado por Cleanergy Renovables incorpora distintas variables de diferentes escalas. Cuando se toma el funcionamiento del biodigestor como un todo, el proyecto asume una dimensión considerablemente grande. Esto se debe a una serie de razones.

En primer lugar, se pueden mencionar los altos costos de capital invertidos en su construcción e instalación, considerando la cantidad de empresas y stakeholders involucrados en el proyecto y cómo el funcionamiento del biodigestor afectará a cada uno de ellos. La estructura del negocio es exhibida en la Imagen 19.



Imagen 19: Estructura del proyecto de Cleanergy.
Fuente: Elaboración propia.

Además de las empresas proveedoras de sustratos, hay socios estratégicos, accionistas e instituciones financieras involucradas en el negocio, así como Cleanergy y los consumidores de la energía y de los subproductos generados.

Se admite también que la inversión asume un cierto grado de riesgo. En caso de que el biodigestor no alcance los niveles estipulados de rendimiento, el payback del capital invertido se prolongará, y las partes involucradas pueden verse afectadas de diferentes maneras. Hay una necesidad de generación continua de energía en las cantidades estipuladas para suplir el funcionamiento de la empresa, pues, al emplear una fuente alternativa, CROPS estará en total dependencia de su buen funcionamiento.

Para ello, hay una serie de variables que deben estar permanentemente bajo control para garantizar que el biodigestor esté siempre operando en buenas condiciones. Entre ellas, se puede mencionar la calidad y la proporción de la mezcla de sustratos, las condiciones de temperatura y presión en su interior, el nivel de agitación de la mezcla, los pretratamientos de residuos que sean necesarios y, principalmente, la disponibilidad de sustratos para mantenerlo siempre en marcha.

Hay también que evaluar el período de vigencia del proyecto. Con una perspectiva de 20 años, se trata de un plazo relativamente largo. Considerando las actuales inestabilidades del país y posibles acontecimientos en otras partes del mundo que puedan afectar a la economía argentina, es difícil determinar con seguridad, a largo plazo, lo que puede eventualmente pasar en el futuro y la dimensión en que puede afectar el negocio.

Por ser un proceso continuo, el funcionamiento del biodigestor requiere diariamente una determinada cantidad de residuos orgánicos como materia prima. En el caso de CROPS, esta cantidad se estima alrededor de 120 toneladas por día para alimentar la planta de biogás. En promedio, el tiempo de transformación de la materia prima orgánica en biogás está alrededor de 25 días. Así, la necesidad diaria es un punto importante a ser considerado en el análisis propuesto por ese trabajo.

Algunas reflexiones se hacen presentes partiendo de esa cuestión. Centrándose nuevamente el análisis en el hecho de que las empresas de categoría 1 son las principales proveedoras con las cuáles la planta Villa del Rosario I cuenta para abastecerse, ellas giran en torno a la siguiente cuestión central: ¿cómo garantizar que el proyecto se mantenga sustentable en un largo de 20 años? La problemática planteada por esta cuestión es de fundamental análisis para que el propósito del proyecto de la Cleanergy sea alcanzado, pues, como ya se ha mencionado, la alta dependencia de la disponibilidad diaria de grandes cantidades de materia orgánica puede comprometer los rendimientos del biodigestor.

En el Gráfico 9, se puede observar la participación de cada una de las empresas proveedoras en los 9724 m³ estimados para la generación diaria de biogás.

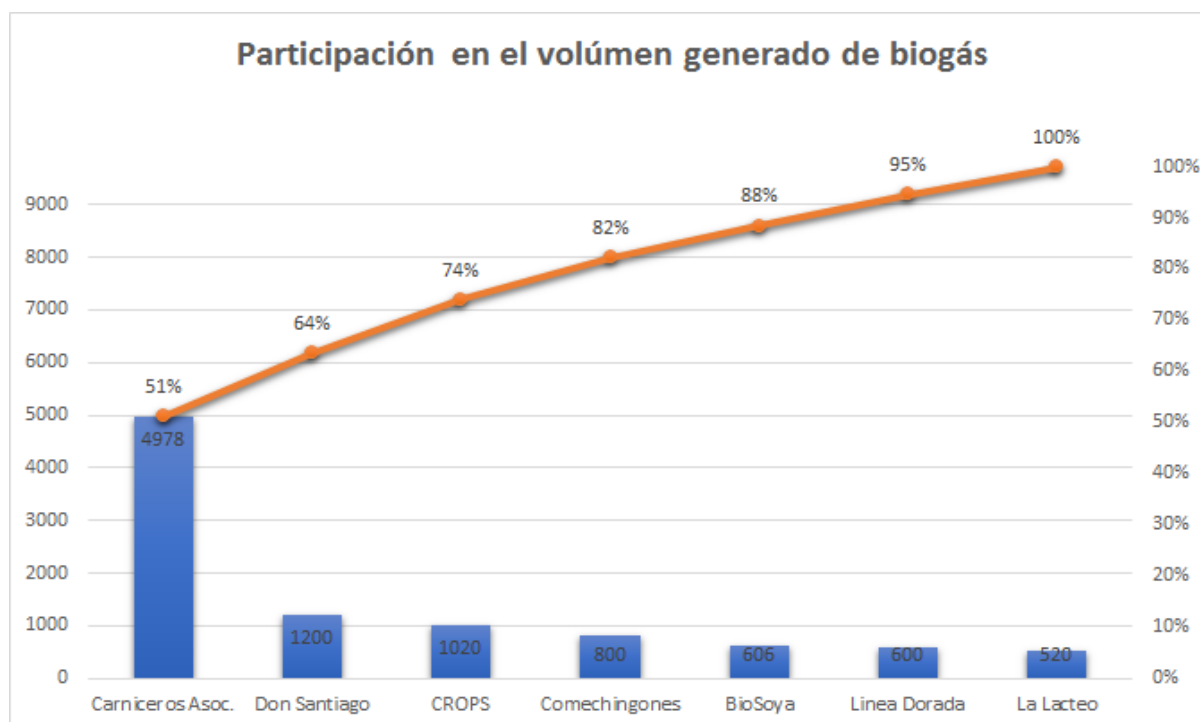


Gráfico 9: Participación en el volumen de biogás generado por empresa proveedora.

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar, cerca de la mitad del volumen generado de biogás proviene de los residuos suministrados por la empresa Carniceros Asociados. En proporciones menores, están Don Santiago y CROPS, seguidos por las demás proveedoras. Esa alta dependencia de los suministros de Carniceros Asociados puede representar un punto que merece cierta atención, pues, si pasa algo que afecta su suministro, la generación de biogás de la planta se vería fuertemente afectada. Dicha consideración puede admitir distintas condiciones que se pueden cambiar en el futuro, como, por ejemplo, la posibilidad de que algunas empresas decidan cobrar por el suministro de los sustratos, eventuales hechos que pueden pasar en la logística (factores climáticos que puedan retrasar o imposibilitar determinadas rutas, el camión se romper por algún motivo, cuestiones de tráfico que puedan afectar la recolección, etc.).

Una manera que se puede adoptar con la intención de garantizar que la planta de biogás siempre tenga disponible la cantidad de residuos que necesita para funcionar es trabajar con un margen de contingencia.

Así, para desarrollar un nivel mayor de seguridad en sus operaciones, la planta debería buscar maneras de generar un volumen mayor que los 9724 m³ diarios de biogás. Generando 30% más que el estimado, por ejemplo, el volumen estaría en cerca de 12600 m³, suficiente para cubrir los 7% más que la planta necesita para su auto funcionamiento y mantener una cierta “tranquilidad” respecto a lo que tiene que generar diariamente de energía. Además, trabajando siempre con un margen más allá de generación establecida en el proyecto, la planta se puede blindar ante eventuales hechos como los recién mencionados, pues tiene una contingencia para cubrir su suministro y asegurar la generación.

Según los análisis y búsquedas hechos de empresas que pueden convertirse en potenciales proveedores para el proyecto, hay dos que podrían sumarse a los proveedores actuales suministrando sus residuos orgánicos.

La primera de ellas es Calidad, un frigorífico ubicado en Jesús María, que podría sumarse suministrando grasas animales generadas como residuos de su producción, que llevan uno de los más altos potenciales de generación de biogás por tonelada según el análisis hecho. El volumen estimado de generación de residuos de la empresa es de 5 toneladas diarias, lo que, de acuerdo con el potencial de generación del Gráfico 4, pueden convertirse en casi 3400 m³ de biogás adicionales al volumen estimado actualmente. Dicho volumen, si tomamos el promedio de 2 kWh de energía generada por metro cúbico de

biogás, podrían lograr a la planta cerca de 6,8 MWh más en su generación diaria de energía. En la Imagen 20, se puede observar el incremento sobre la generación propuesto por los suministros de Calidad.

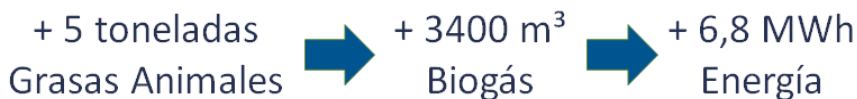


Imagen 20: Incremento en la generación desde el frigorífico Calidad.

Fuente: Elaboración propia.

La segunda empresa en este sentido es Línea Dorada, que ya hace parte del proyecto como proveedora de suero de leche. Lo que se sabe es que, además del suero, la empresa genera una gran cantidad de estiércol bovino, que actualmente no se destina para ningún uso final, sino para su degradación natural.

La cantidad estimada está cerca de 10 toneladas diarias. Adoptando el potencial promedio de generación de 21,8 m³/ton de estiércol bovino, dicha cantidad sería capaz de generar poco más de 430 kWh junto a la mezcla. Es un volumen bajo comparado con la energía que pueden generar los residuos de Calidad, debido al hecho de que el estiércol bovino tiene potencial de generación menor que la grasa animal, pero la cantidad generada ya puede ayudar a suministrar el funcionamiento de la planta, por ejemplo. En la Imagen 21, se puede observar el incremento sobre la generación propuesto por los suministros del estiércol de Línea Dorada.



Imagen 21: Incremento en la generación desde el estiércol bovino de Línea Dorada.

Fuente: Elaboración propia.

Por último, otro tipo de sustrato que también puede incorporarse al proyecto Villa del Rosario I son los llamados FORSU - Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos. Como indican los estudios hechos en el tema, la parte orgánica de los residuos urbanos generados por los municipios cercanos puede llegar hasta 10 toneladas diarias, que, considerando su poder calorífico y concentraciones de metano, pueden tener un potencial de generación de hasta 17,2 m³/ton.

Esto representaría cerca de 172 m³ más de biogás generados para la planta, que, convirtiéndose en energía, incrementarían en aproximadamente 340 kWh la cantidad diaria

generada (Imagen 22). Hay que señalar, sin embargo, que para incorporarles al proyecto, sería necesario su separación previa y algunos pre-tratamientos, para garantizar que no se van a meter sustratos contaminados o de mala calidad en el biodigestor. La logística también se afectaría en el sentido de que los puntos de recolección son varios, y los volúmenes pueden variar de un municipio para otro.



Imagen 22: Incremento en la generación desde la FORSU.
Fuente: Elaboración propia.

En síntesis, con la incorporación de los nuevos suministros propuestos, el escenario base de funcionamiento se convertiría en el siguiente, como muestra la Tabla 14:

Sustrato	Proveedor	Suministros (t/día)	Potencial de generación biogás (m ³ /t)	Generación total (m ³ de biogás)
Suero de Leche	Línea Dorada	15	40	3000
	La Lacteo	10		
	Don Santiago	30		
	Comechingones	20		
Gomas Vegetales	BioSoya	1	606	606
Grasas Animales	Frigorífico Qualitá	5	678	8136
	Carniceros Asoc.	7		
Resíduos de estómago	Carniceros Asoc.	2	116	232
Grasas DAF	La Lacteo	1	120	120
Estiércol Porcino	CROPS	40	25,5	1020
Estiércol Bovino	Línea Dorada	10	21,8	218
FORSU	Municipios cercanos	10	17,2	172
TOTAL		151		13504
Generación diaria de Energía (kWh):				27008

Tabla 14: Panorama de funcionamiento de la planta con los nuevos suministros propuestos.
Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar, incorporando los nuevos suministros al proyecto, el volumen generado de biogás pasa de 9724 m³ para cerca de 13500 m³, representando un aumento de 38% en relación al inicial. Proporcionalmente, la generación de energía se incrementa en cerca de 7500 MWh, haciendo con que la planta genere casi 40% más diariamente. La composición final de la mezcla se convertiría en como muestra el Gráfico 10:

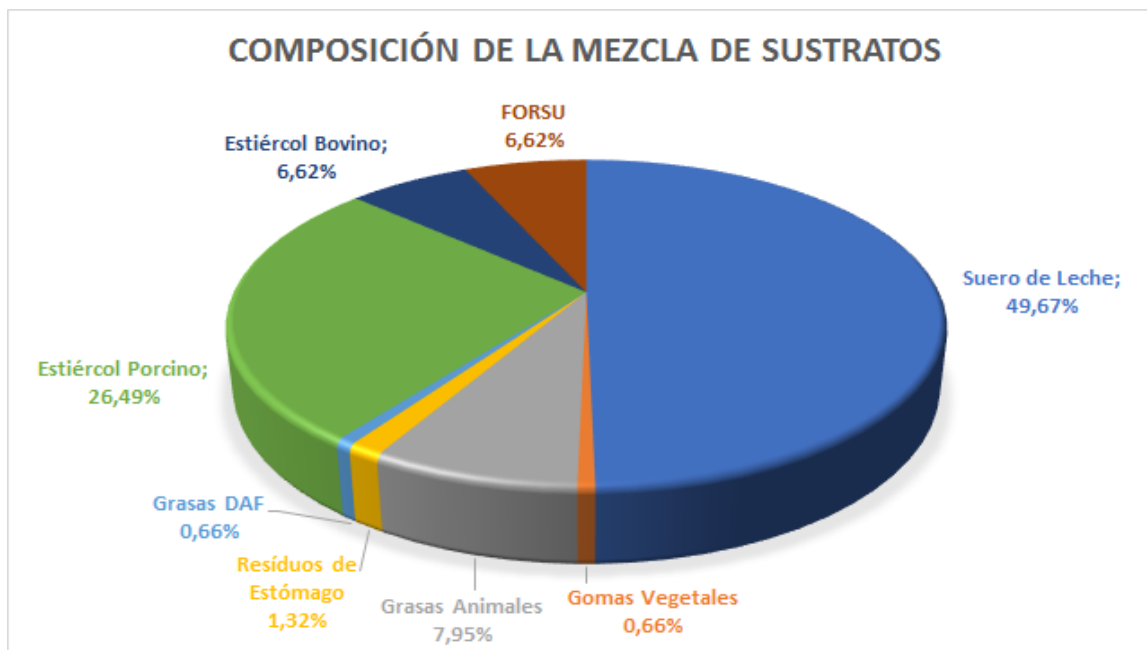


Gráfico 10: Composición de la mezcla con los nuevos suministros propuestos.

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede señalar, además de la mezcla convertirse más variada en tipos y volumen de sustratos, los nuevos parámetros estimados de generación para la planta pueden brindar mayor seguridad al proyecto en sus operaciones. Además, produciendo 38% más que sus necesidades, Villa del Rosario I puede operar tranquilamente con un margen de contingencia ante cualquier eventualidad que pueda afectar el rendimiento de la planta.

4.6 Indicadores

En este capítulo se definen los KPI (Key Performance Indicator), conocidos también como indicadores clave o medidores de desempeño. Estos son una medida del nivel del rendimiento de un proceso. El valor del indicador está directamente relacionado con un objetivo fijado previamente y normalmente se expresa en valores porcentuales. Un KPI se diseña para mostrar cómo es el progreso en un proceso o producto en concreto, por lo que es un indicador de rendimiento.

Los indicadores clave de desempeño son mediciones utilizadas para cuantificar el grado de cumplimiento de los objetivos, reflejan el rendimiento de una organización y generalmente se recogen en su plan estratégico. El monitoreo de los mismos se utiliza

para detectar desviaciones y poder tomar acciones correctivas, como así también se utilizan para la toma de decisiones estratégicas.

En nuestro caso, se han recolectado indicadores de distinta naturaleza, y los agrupamos en dos categorías distintas, indicadores del proceso, que dan información a un nivel de rendimiento y funcionamiento operativo, y, en segundo lugar, los indicadores de gestión, que exponen información de los procesos globales o generales, y brindan apoyo a las tomas de decisiones estratégicas.

Dentro de los indicadores operativos, hay distintos parámetros de funcionamiento de la planta que deben ser monitoreados de forma continua. El primero de ellos es respecto a la composición del biogás generado. Se suele analizar el caudal de biogás en la salida del biodigestor, antes de irse al motor, y tomar muestras para análisis del porcentaje de metano y CO₂ en su composición, la concentración de sulfuro hidrogeno en ppm y otros aspectos que reflejen la calidad del biogás que está siendo producido. También se puede analizar el calor generado en el proceso.

Por otro lado los parámetros biológicos de muestras de la mezcla que pueden ser tomadas desde el digestor y del hidrolizador. Estos incluyen análisis hechos en laboratorio sobre su composición (cantidad de proteínas y carbohidratos convertibles en biogás, por ejemplo), acidez, siendo que residuos muy ácidos afectan el pH de la mezcla, su densidad, que influye en el tiempo de retención, y otros del tipo.

Para los indicadores de gestión, los principales planteados son:

- Eficiencia de la planta:
$$\frac{\text{Generación diaria de energía (kWh)}}{\text{Volumen diario generado de biogás (m}^3\text{)}}$$

El objetivo de este indicador es medir el nivel de desempeño promedio e inmediato que está teniendo el biodigestor, y el mismo se puede llevar a cabo realizando una medición del caudal de biogás que saliente (m³) y relacionarlo con los resultados de energía en obtenida (kWh). Haciendo la división, el valor esperado para este indicador es no menor a 2 kWh/m³ de biogás. Valores por debajo de este nivel implicaría una disconformidad en el proceso global, debiéndose analizar las posibles causas como la composición del biogás, composición y proporción de sustratos, parámetros de la planta como el pH, temperatura y otros. En un rango de 1,8 a 2,5 kWh/m³, el valor puede ser aceptable, pero si baja para menos que el límite inferior, hay que investigar que causas especiales pueden estar actuando en el proceso.

- Cumplimiento de la generación establecida: $\frac{\text{Generación diaria de energía}}{\text{Meta de generación diaria}} \times 100$

Uno de los indicadores más importantes así como el de rendimiento, es el nivel de cumplimiento que está realizando la planta de biogás, porque en definitiva se esperan ciertos resultados o producción para que el proyecto y razón de ser de la planta alcance la rentabilidad estimada, de ganancias y no pérdidas. Para el caso de estudio, la empresa Cleanergy fijó un valor de 20 MWh por día, valor que forma a su vez parte del contrato establecido con el gobierno a través del programa RenoVar. Este indicador se complementa con su predecesor, ya que un bajo nivel al establecido puede deberse a fallas en el rendimiento por un lado, y por el otro, el causante pueden ser faltantes de materia prima, menor volumen al esperado en biogás debido a mezclas ineficientes, entre otros. Se monitorea como porcentaje de cumplimiento de la generación diaria establecida, que, en el caso, es 20 MWh.

- Tiempo de retención en el biodigestor: $\frac{\text{Capacidad del biodigestor (m}^3\text{)}}{\text{Volumen diario colocado (m}^3\text{/día)}}$

Como se ha mencionado en el marco técnico, el TRH es el tiempo de permanencia de un determinado residuo en el digestor para que toda la sustancia orgánica se transforme en metano. Un valor aproximado será el que se obtiene de dividir el volumen del reactor por el volumen de sustrato diario alimentado. Que para nuestro caso son los siguientes. El proyecto busca alcanzar un rango entre 20 y 30 días. Los factores de diseño, la geometría del digestor, el mezclado etc. podrán hacer variar este parámetro de forma notable para algunos contenidos concretos del sustrato. Así el tiempo de retención mínimo a aplicar dependerá de la temperatura de trabajo y de la naturaleza del sustrato. Si el indicador da valores menores al inferior (20 días es el mínimo y necesario para que las bacterias consuman y se desarrollen) se produce el fenómeno llamado “washout” o lavado de las bacterias, por las que estas salen del digestor sin haberse desarrollado interrumpiendo así el proceso. Valores mayores al superior, puede referirse por ejemplo un porcentaje de sólidos totales mayor al óptimo y por ende aumento de su viscosidad, por lo que las bacterias encontrarán dificultad en digerir la materia, tomando más tiempo para realizarlo.

Con estos indicadores propuestos, se puede tener una idea si, después de su puesta en marcha, la planta sigue el funcionamiento para que fue proyectada.

5. CONCLUSIÓN

La propuesta del proyecto Villa del Rosario I es una alternativa para dos temas muy actuales que son la disposición final de los residuos y la generación de energía desde fuentes renovables. Teniendo en cuenta el avance de los temas ambientales y la relevancia de proyectos así, Cleanergy ha presentado un proyecto viable e innovador al adaptar un modelo canadiense a la región central de Argentina.

Con relación a los objetivos de análisis planteados en el inicio de este trabajo, se pudo percibir durante su desarrollo la importancia del mismo, ya que el grado de profundidad y detalle alcanzado en algunos aspectos mostró lo complejo que puede llegar a ser el proyecto, siendo algunos puntos, merecedores de una atención especial por parte de la empresa.

En el tema de los sustratos, en primer lugar, se pudo desarrollar algunas opciones que se tiene para trabajar con la mezcla, siendo más variada o no, según los niveles de rendimiento que se busca y los aspectos operativos involucrados. Una mezcla más variada puede exigir mayores trabajos logísticos, pero logra una buena diversificación del riesgo de no depender solo de pocos proveedores, y así, un mayor poder de negociación también desde el punto de vista de fuerzas competitivas. En contrapartida, trabajar con mayores cantidades de sustratos de alto rendimiento logra una buena eficiencia para los valores de generación de biogás y energía, demandando menores cantidades de suministros.

Con relación a los proveedores, se puede señalar que en las cercanías del proyecto, hay una serie de empresas que pueden convertirse en potenciales proveedores de residuos orgánicos, lo que muestra que el proyecto tiene un alto potencial para expandirse y alcanzar una mayor distinción en la región de Villa del Rosario. El análisis hecho puede servir para decisiones en este sentido, en el caso de que la empresa desee incrementar las capacidades de la planta para incorporar nuevos sustratos.

De los análisis logísticos que fueron hechos, se pudo relevar los principales aspectos operativos y restricciones de la recolección de los sustratos desde sus proveedores. Las propuestas han incorporado una ruta adaptada desde la ruta óptima generada por el modelo matemático, debido a algunas restricciones de capacidad y alternativas viables para hacerla desde el alquiler de camiones cisternas (líquidos) y de carga (sólidos). La logística del proyecto es un punto clave para el funcionamiento de la

planta de biogás, pues el suministro debe ser siempre continuo, implicando una logística eficiente y flexible.

Los escenarios propuestos han incorporado algunos factores externos que pueden ocurrir en el futuro, planteando posibles efectos sobre el funcionamiento y la generación de la planta. El análisis en que se trabaja con rangos de variación y no valores fijos permite verificar el comportamiento del proyecto ante variaciones establecidas, y no limita sus estimaciones a un único valor. Además, hay que considerar que el tema de generación de energía desde el biogás es un tema un tanto reciente, que todavía no hay grandes estudios de referencia a nivel global que pueden ser tomados como base por su alta variabilidad en función de factores económicos, políticos, sociales y culturales de cada país. Trabajando con intervalos y límites superior e inferior, la empresa tiene mayores posibilidades de acertar en sus estimaciones, pues logra un nivel de confianza razonable para el comportamiento de las variables del estudio.

La sustentabilidad del proyecto también puede ser otro punto a que se debe dedicar una atención especial. Según las estimaciones hechas en el proyecto, la planta Villa del Rosario I tendría sus niveles de generación aceptables con relación a la meta propuesta, pero los alcanzaría con una alta dependencia de pocos proveedores. Considerando el contexto económico del país actualmente, es difícil garantizar que las condiciones proyectadas se mantengan en un largo de 20 años. Así, la propuesta de incorporar el estiércol de Línea Dorada, que ya es una empresa proveedora del proyecto, la fracción orgánica de los RSU municipales y las grasas animales del frigorífico Calidad se muestra factible e interesante para Cleanergy. Con esto, la planta puede aumentar su generación en casi 40%, produciendo energía suficiente para su propio funcionamiento y para la demanda exigida por el programa RenoVar.

Por último, los indicadores propuestos se hacen útiles para la gestión y el monitoreo del proyecto y las operaciones de la planta de biogás, una vez que el mismo esté funcionando. Los parámetros de monitoreo continuo del proceso deben garantizar la buena calidad del biogás para la generación de energía. En cuanto a los indicadores de gestión, la eficiencia de la generación puede ser un KPI para evaluar si la planta está cumpliendo con las condiciones proyectadas, así como el tiempo de retención y el cumplimiento de la generación establecida.

De manera general, se puede admitir que la principal contribución de este trabajo para la empresa y para el proyecto fueron los análisis detallados de logística pedidos por la propia empresa, ya que así nace nuestra tesis, para luego incluir algunos aspectos más de gestión, como los escenarios e indicadores propuestos. Logrando, para la empresa, un mayor grado de certidumbre en sus decisiones relacionadas al proyecto, basadas en los análisis aportados por el trabajo y evaluados por los directores de tesis de la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba.

Lo que este proyecto final ciertamente brindó, fue un espacio para la aplicación de muchas de las herramientas aprendidas, conocimientos leídos y aprobados en los años pasados, fue una experiencia particular que nos permitió una vez más poder afianzar dichos conocimientos y herramientas al llevarlos a la práctica. También es interesante el hecho de que en la práctica, cada caso tiene sus restricciones, variables y factores que la afectan, lo que hace necesario aplicar la ingeniería de manera adecuada a ellos.

Entre los conocimientos y herramientas adquiridas están los estudiados en materias más avanzadas como evaluación de proyectos, para los aspectos de planteo de escenarios, logística, para poder establecer las rutas óptimas de recolección, y desde materias básicas como física y química, para un entendimiento real del objeto de estudio y su funcionamiento, hasta más específicas de Ingeniería Industrial como control de gestión o planificación y control de producción, los cuales jugaron un rol importante en la importancia de la aplicación de indicadores y cálculos de producción, proyectamos conceptos de manejo y distribución de planta, al trabajar con unidades de carga y distribución. Además, fue fundamental una visión analítica general de carácter ingenieril, que acompañó en todos los razonamientos planteados para lograr la realización del presente trabajo.

REFERENCIAS

GARCÍA, Lucas. **“Diseño de un Digestor para una Planta de Biogás Agroindustrial”**. Santander. Año 2017.

GOBIERNO DE CHILE, MINISTERIO DE ENERGÍA, PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL DESARROLLO, ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA. **“Manual de Biogás”**. Santiago de Chile. Año 2011.

HILBERT, Ing. A. M. Sc. Jorge A. **“Manual para la Producción de Biogás”**. Disponible en: <https://civilgeeks.com/2018/01/12/manual-la-produccion-biogas/>. Accedido en jun 2018.

DROSG, Bernhard. **“Process Monitoring in Biogas Plants”**. IEA BIOENERGY. Año 2013.

BARRA, BONATI, GIUSSANO. **“Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos”**. Córdoba-Argentina. Año 2017.

PORTAL DO BIOGÁS. **“Potencial de Geração de Biogás”**. Brasil. Disponible em: <https://www.portaldobiogas.com/potencial-de-geracao-de-biogas/>. Accedido em ago 2018.

LADINO, Edwin Darío Cendales. **“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. Año 2011.

INTA. **“Evolución del Sistema Productivo Agropecuario Argentino, Actualización Técnica N°66”**. Buenos Aires-Argentina. Año 2011.

MILLER, TUCKER, ZEMLIN. “Integer Programming Formulation of Traveling Salesman Problems”. ACM Journal. New York, NY, USA. Año 1960.

PORTAL TODOAGRO. **“El desbarranque de La Lácteo impacta en tamberos y proveedores”**. Disponible en: <http://www.todoagro.com.ar/noticias/nota.asp?nid=37354>. Accedido en oct 2018.

DIARIO JORNADA. **“¿En qué consiste el plan de energías "RenoVar"?”**. Disponible en: http://www.diariojornada.com.ar/160093/economia/En_que_consiste_el_plan_de_energias_RenoVar. Año 2016.

AGENCIA ANDALUZA DE ENERGÍA, CONSEJERÍA DE ECONOMÍA, INNOVACIÓN Y CIENCIA. **“Estudio Básico del Biogás”**. Andalucía-España. Año 2011.

FOUNDATION ELLEN MACARTHUR. **“Economía Circular”**. Disponible en: https://economiecircular.org/wp/?page_id=62. Accedido en may 2018.

LEY 27424. **“Régimen De Fomento A La Generación Distribuida De Energía Renovable Integrada A La Red Eléctrica Pública”**. Argentina. Año 2017.

CLEANERGY RENOVABLES S.A. Córdoba-Argentina.

ANEXOS

ANEXO I - Modelo matemático del análisis logístico para los sustratos líquidos

```

! Traveling Salesman Problem.
! The Miller, Tucker, Zemlin, 1960, J. ACM, single commodity formulation;

SETS:
  CITY : LVL;
  CXC( CITY, CITY): DIST, Z;
  CXCSUB( CXC): DCITY, ACITY, ARROHD;
ENDSETS

DATA:
CITY = LD DS CO LL CR;
DIST =
!      LD DS CO LL CR
!LD;   0 53 16 15 20
!DS;   53 0 69 41 44
!CO;   16 69 0 30 35
!LL;   15 41 30 0 4
!CR;   20 44 35 4 0
;
ENDDATA

SUBMODEL
TSPROB:! Warning: May take long to solve cases with N >> 12;
! Variables:
  Z(i,j) = 1 if vehicle tour includes link from i to j, else 0,
  LVL(i) = sequence number of stop i on the tour, or also
          load on vehicle upon departing stop i. One unit of
          load is picked up at each stop. Starts empty at stop 1;
! Minimize total distance traveled;
MIN = OBJV;
  OBJV= @SUM( CXC(i,j): DIST(i,j) * Z(i,j));

  @FOR( CITY( k):
! It must be entered exactly once;
  @SUM( CITY( i)| i #NE# k: Z( i, k)) = 1;
! It must be departed exactly once;
  @SUM( CITY( j)| j #NE# k: Z( k, j)) = 1;
  Z( k, k) = 0; ! Cannot go from k to k;
  );

! A weak but simple form of the subtour breaking constraints,
  see Desrochers & Laporte, OR Letters, Feb. 91.
  Not very powerful for large(N>12) problems.
  For large problems need to use more complicated
  subtour elimination methods;
! Enforce:
  If Z(i,j) = 1 then u(j) - LVL(i) = 1,
  If Z(j,i) = 1 then LVL(j) - LVL(i) = -1,
  If Z(i,j) + Z(j,i) = 0, and i,j > 1,
    then LVL(j) - LVL(i) >= -(N - 2);

  LVL(1) = 0; ! Start empty;

! The case either i or j = 1;

```

```

@FOR( CITY(i) | i #GT# 1:
  LVL(i) >= 2 - Z(1,i) + (N-3)*Z(i,1);
  LVL(i) <= (N-2) + Z(i,1) - (N-3)*Z(1,i);
);

! The case i,j > 1,
! This constraint, plus its "mirror", when i and j are switched,
! forces LVL(j) - LVL(i) = 1 if Z(i,j) = 1;
@FOR( CXC(i,j) | i #GT# 1 #AND# j #GT# 1 #AND# i #NE# j:
  LVL( j) >= LVL( i) + Z(i,j)
    - Z(j,i)
    - (N-2)*(1 - Z(i,j) - Z(j,i));
);

! Make the Z's 0/1;
@FOR( CXC(i,j): @BIN( Z(i,j)););

! Some optional cuts, which may or may not help;
! We know the sum of the stop numbers;
@SUM( CITY( i): LVL( i)) = ( N-1)*N/2;

! Two-city subtour breaking cuts;
! @FOR( CXC( i,j) | i #LT# j:
  Z(i,j) + Z(j,i) <= 1
);
ENDSUBMODEL

CALC:
  @SET( 'TERSEO',2); ! Output level (0:verb, 1:terse, 2:only errors, 3:none);

!The model size: Warning, may be slow for N > 10;
N = @SIZE( CITY);
! @GEN( TSPROB);
@SOLVE( TSPROB);
! Construct the subset, CXCSUB(i,j), of arcs selected;
@FOR( CXC( i,j) | Z(i,j) #GT# 0.5:
  @INSERT( CXCSUB, i, j);
  DCITY(i,j) = i; ! Departure city;
  ACITY(i,j) = j; ! Arrival city;
  ARROHD(i,j) = 1; ! No arrowheads on this arc;
);

ENDCALC

```

ANEXO II - Modelo matemático del análisis logístico para los sustratos sólidos

```
! Traveling Salesman Problem.
! The Miller, Tucker, Zemlin, 1960, J. ACM, single commodity formulation;
```

```
SETS:
```

```
CITY : LVL;
CXC( CITY, CITY): DIST, Z;
CXCSUB( CXC): DCITY, ACITY, ARROHD;
```

```
ENDSETS
```

```
DATA:
```

```
CITY = BS CA LL CR;
```

```
DIST =
```

```
!      BS CA LL CR
!BS;   0  2  2  7
!CA;   2  0  3  8
!LL;   2  3  0  4
!CR;   7  8  4  0
```

```
;
```

```
ENDDATA
```

```
SUBMODEL
```

```
TSPROB:! Warning: May take long to solve cases with N >> 12;
```

```
! Variables:
```

```
  Z(i,j) = 1 if vehicle tour includes link from i to j, else 0,
  LVL(i) = sequence number of stop i on the tour, or also
           load on vehicle upon departing stop i. One unit of
           load is picked up at each stop. Starts empty at stop 1;
```

```
! Minimize total distance traveled;
```

```
MIN = OBJV;
```

```
  OBJV= @SUM( CXC(i,j): DIST(i,j) * Z(i,j));
```

```
@FOR( CITY( k):
```

```
! It must be entered exactly once;
  @SUM( CITY( i)| i #NE# k: Z( i, k)) = 1;
! It must be departed exactly once;
  @SUM( CITY( j)| j #NE# k: Z( k, j)) = 1;
  Z( k, k) = 0; ! Cannot go from k to k;
);
```

```
! A weak but simple form of the subtour breaking constraints,
  see Desrochers & Laporte, OR Letters, Feb. 91.
```

```
Not very powerful for large(N>12) problems.
```

```
For large problems need to use more complicated
subtour elimination methods;
```

```
! Enforce:
```

```
  If Z(i,j) = 1 then u(j) - LVL(i) = 1,
  If Z(j,i) = 1 then LVL(j) - LVL(i) = -1,
  If Z(i,j) + Z(j,i) = 0, and i,j > 1,
    then LVL(j) - LVL(i) >= -(N - 2);
```

```
LVL(1) = 0; ! Start empty;
```

```
! The case either i or j = 1;
```

```
@FOR( CITY(i) | i #GT# 1:
  LVL(i) >= 2 - Z(1,i) + (N-3)*Z(i,1);
  LVL(i) <= (N-2) + Z(i,1) - (N-3)*Z(1,i);
);
```

```

! The case  $i, j > 1$ ,
! This constraint, plus its "mirror", when  $i$  and  $j$  are switched,
  forces  $LVL(j) - LVL(i) = 1$  if  $Z(i, j) = 1$ ;
@FOR( CXC(i, j) | i #GT# 1 #AND# j #GT# 1 #AND# i #NE# j:
    LVL( j) >= LVL( i) + Z(i, j)
        - Z(j, i)
        - (N-2)*(1 - Z(i, j) - Z(j, i));
);

! Make the Z's 0/1;
@FOR( CXC(i, j): @BIN( Z(i, j)););

! Some optional cuts, which may or may not help;
! We know the sum of the stop numbers;
@SUM( CITY( i): LVL( i)) = ( N-1)*N/2;

! Two-city subtour breaking cuts;
! @FOR( CXC( i, j) | i #LT# j:
    Z(i, j) + Z(j, i) <= 1
);
ENDSUBMODEL

CALC:
@SET( 'TERSEO', 2); ! Output level (0:verb, 1:terse, 2:only errors, 3:none);

!The model size: Warning, may be slow for  $N > 10$ ;
N = @SIZE( CITY);
! @GEN( TSPROB);
@SOLVE( TSPROB);
! Construct the subset, CXCSUB(i, j), of arcs selected;
@FOR( CXC( i, j) | Z(i, j) #GT# 0.5:
    @INSERT( CXCSUB, i, j);
    DCITY(i, j) = i; ! Departure city;
    ACITY(i, j) = j; ! Arrival city;
    ARROHD(i, j) = 1; ! No arrowheads on this arc;
);

ENDCALC

```