

Generación eléctrica del biogás de ganado vacuno de granjas ganaderas del sur de Chile

Manuel J. Martínez-Bordes¹, Richard E. Carrasco-Agoni¹, Agustín Donoso-Albornoz¹, Antonio Garrido-Figueroa¹, Manuel Rivero-Díaz¹, Natalia Campos-Albornoz¹

¹Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño, Universidad San Sebastián-sede Valdivia, Chile. Email: manuel.martinez@uss.cl

Resumen

Este trabajo aborda una problemática recurrente en las unidades ganaderas del sur del país relacionada con la falta de aprovechamiento de los excrementos del ganado vacuno, desde un punto de vista energético. Para tal fin se propone la construcción de una planta de producción de biogás a partir de estos excrementos para generación de electricidad y compostaje. Para garantizar el funcionamiento debe planearse un conjunto de rutas de recolección a las diferentes unidades ganaderas con un costo óptimo. El análisis partió considerando una microturbina de 1 MW de potencia, cuya alimentación de biogás provendría de los excrementos de 14.100 bovinos. La recolección de 211 toneladas diarias de excrementos se llevaría a cabo con 9 camiones de 24,7 t de carga. La planta estaría ubicada en la comuna de Río Negro y la inversión monetaria generaría una TIR de 11,94% para un horizonte de 15 años.

Palabras clave: unidades ganaderas; biogás; ruteo; CVRP.

Abstract

This work addresses a recurring problem in livestock units in the south of the country related to the lack of use of cattle excrement, from an energy point of view. For this purpose, the construction of a biogas production plant from these excrements for electricity generation and composting is proposed. To guarantee operation, a set of collection routes to the different livestock units must be planned at an optimal cost. The analysis started by considering a microturbine of 1 MW of power, whose biogas supply would come from the excrement of 14,100 cattle. The collection of 211 tons of excrement per day would be carried out with 9 trucks with a load of 24.7 tons. The plant would be located in the municipality of Río Negro and the monetary investment would generate an IRR of 11.94% for a horizon of 15 years.

Keywords: livestock units; biogas; routing; CVRP.

1. Introducción

El aprovechamiento de los excrementos del ganado vacuno para la producción de biogás resulta una opción atractiva para la transformación de energía renovable. No obstante, esto es un reto significativo para pequeños y medianos ganaderos debido a los altos costos que les representa la explotación de estos residuos. Por lo tanto, se evidencia una oportunidad de utilización de esta potencial fuente de energía que, además, conllevaría a una reducción de las emisiones de gases contaminantes. Este estudio tiene como objetivo evaluar la posibilidad de instalación de una planta de biogás, ya sea en la región de Los Ríos o de Los Lagos, de forma que, por medio de una adecuada planeación de rutas de recolección de excrementos de

ganado de unidades ganaderas, se garantice el suministro constante de materia prima a la planta. Se plantea un análisis técnico en cuanto a la localización de la planta, dimensionamiento y logística y un análisis de costos que determine la conveniencia o no de tal instalación.

2. Métodos

2.1. Estimación de producción potencial de biogás en las regiones

La Tabla 1 expone las existencias de animales, por especie, en ambas regiones.

Tabla 1. Existencias de animales en las regiones de Los Ríos y de Los Lagos.

Existencias de animales en ambas regiones		
Especie	Los Ríos	Los Lagos
Bovinos	485.638	774.321
Ovinos	85.294	227.798
Caprinos	6.538	9.082
Porcinos	20.935	42.429
Caballares	8.440	9.749
Gallinas, Pollos	220.103	390.138
Otras aves corral	31.433	52.368
Otros	6.424	14.525
Totales	864.805	1.520.410

Fuente: Instituto Nacional de Estadística, INE [1].

El ganado bovino predomina sobre las restantes especies con 56% en la región de Los Ríos y 51% en la región de Los Lagos. Dado que, de un bovino grande mayor de tres años, se puede obtener 15 kg de excrementos diarios y de esa cantidad producir alrededor de 0,6 m³ diarios [2] en la siguiente tabla se resume la cantidad potencial de excrementos y volumen de biogás que se generaría con el ganado bovino de las dos regiones.

Tabla 2. Producción potencial diaria de excrementos y biogás a partir del ganado vacuno. Se exceptúan terneras y terneros.

Cabezas de ganado bovino		
	Los Ríos	Los Lagos
Excrementos (t)	7.058,64	12.981,95
Biogás (miles m ³)	282,35	519,28

Fuente: Instituto Nacional de Estadística, INE, 2021 [3].

Con el potencial del volumen de biogás de las dos regiones se podría alimentar a 8 plantas de generación eléctrica con capacidad de 12,6 MW equivalente a la planta de Las Lajas (región de Biobío) [4].

2.2. Generación de potencia

La generación de potencia depende, principalmente, de las capacidades de generación de equipos a biogás disponibles en el mercado y de la disponibilidad de materia prima. En el caso de microturbinas, las capacidades oscilan desde 65 kW hasta 1-1,15 MW [5], [6], [7] y de las turbinas desde 10 MW [7], [8] hasta 18 MW [9]. Asumiendo una estrategia conservadora, se analiza el caso de la utilización de una microturbina de 1 MW para delimitar el número de biodigestores necesarios, localización de la planta que mejor satisfaga requerimientos operacionales y

del recorrido de los equipos de recolección de excrementos del ganado.

2.2.1. Requerimiento de biogás del generador

Para estimar el consumo de biogás de un generador de 1 MW se consideran los siguientes datos para una turbina Jenbacher J320, Tabla 3.

Tabla 3. Datos para obtención de flujo de biogás requerido.

Potencia eléctrica (MWe)	0,990-1,067
Potencia térmica (MWth)	2,769-3,560
Eficiencia eléctrica (η_e)	0,459
Eficiencia termod. (η_{th})	0,455
PCI biogás (MJ/m ³)	22,6 [10]
Contenido CH ₄ (% vol)	60 [11]

Fuente: Datos técnicos de Jenbacher J-320 [7].

En función de la eficiencia termodinámica de la turbina la energía requerida para producir 1 MW se estima en 7.912 MJ/h. Dado el poder calorífico valorado en 22,6 MJ/m³, proporciona un flujo másico de biogás de 350,1 m³/h.

2.2.2. Volúmenes de sumidero, separador, digestor y separador

La mezcla de los excrementos del ganado y del agua se lleva a cabo en un sumidero en una proporción de 1,5 partes de agua por una parte de excremento. Posteriormente, en un sedimentador se separan las impurezas y, a continuación, la mezcla diluida lista para la fermentación se transfiere al digestor anaeróbico. Después de la fermentación, en función del tiempo de retención en días, HRT, el gas producido se puede utilizar para la generación de electricidad. El residuo fermentado es separado en compost y otros líquidos reciclados. La producción de 350,1 m³/h de biogás requeriría, al menos, 14.100 cabezas de ganado bovino, N_{bov} . La estimación de los volúmenes de los tanques de sumidero, V_{sum} , sedimentador, V_{sed} , digestor, V_{dig} , y separador, V_{sep} se obtienen aplicando las ecuaciones (1) a (5).

$$V_{sum} = N_{bov} \cdot \left(\frac{M_{exc-bov}}{\rho} \right) \cdot \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot 10^{-3} \quad 1)$$

$$V_{sed} = V_{sum} \quad 2)$$

$$V_{dig} = V_{dia} \cdot HRT \cdot \varepsilon_1 \quad 3)$$

$$V_{dia} = \frac{\varepsilon_2}{\rho} M_{exc-dia} \cdot 10^{-3} \quad 4)$$

$$M_{exc-dia} = M_{exc-bov} \cdot N_{bov} \quad 5)$$

donde N_{bov} representa el número de cabezas de bovinos o bovinos, $M_{exc-bov}$ es la masa promedio de

excremento de cada bovino estimada en 15 kg [2], ε_1 y ε_2 son coeficientes de incremento de volúmenes de sedimento (1,2) y del volumen final de la disolución de excrementos y agua (2,5), respectivamente [12], V_{dia} es el volumen diario de estiércol diluido ($\text{m}^3/\text{día}$) y ρ es la densidad de la mezcla de agua y estiércol aproximadamente 1,2 kg/l [11] y se considera un tiempo de retención hidráulica HRT de 40 días [11]. Para la estimación del volumen diario de biogás, V_{gas} , [13] indica que el volumen de gas diario promedio proporcionado por los excrementos de un bovino, A_{gas} , es de $0,6 \text{ m}^3/\text{diario-bovino}$.

2.3. Localización de la planta

Para localizar la planta se utilizó el Proceso de Análisis Jerárquico, AHP, donde se plantearon cuatro criterios para la localización de una planta de biogás: acceso a agua, red eléctrica, vías de comunicación y costo de los terrenos. Un criterio fundamental implícitamente considerado es la cercanía a las fuentes de materia prima ya que los terrenos evaluados (Fresia, Río Negro, Río Bueno y El Salto) están próximos a unidades ganaderas. En la Tabla 4 se describe la matriz de comparación de criterios.

Tabla 4. Matriz de comparación de criterios.

Criterios	Acceso a agua	Red eléctrica	Vías de comunic.	Costo terrenos
Acceso a agua	1	2	3	3
Red eléctrica	0,5	1	2	2
Vías de comunic.	0,333	0,5	1	2
Costo terrenos	0,333	0,5	0,5	1

Fuente: elaboración propia.

Las siguientes tablas muestran las matrices de comparación de alternativas respecto a cada criterio. La Tabla 5 compara alternativas con relación al acceso al agua. El acceso al agua es importante porque forma parte del proceso de obtención del biogás.

Tabla 5. Comparación de alternativas respecto al criterio de acceso al agua.

Alternativas	Fresia	Río Negro	Río Bueno	El Salto
Fresia	1	0,25	0,333	1
Río Negro	4	1	1	2
Río Bueno	3	1	1	2
El Salto	1	0,5	0,5	1

Fuente: elaboración propia.

La Tabla 6 plantea lo mismo para el criterio de cercanía a la red eléctrica. Este criterio es trascendental ya que la planta generará electricidad que podrá ser suministrada al sistema eléctrico regional o nacional.

Tabla 6. Comparación de alternativas respecto al criterio de cercanía a la red eléctrica.

Alternativas	Fresia	Río Negro	Río Bueno	El Salto
Fresia	1	0,333	2	2
Río Negro	3	1	2	3
Río Bueno	0,5	0,5	1	2
El Salto	0,5	0,333	0,5	1

Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 7 y Tabla 8 se plantean las comparaciones para los criterios de proximidad a vías de comunicación y precio de los terrenos.

Tabla 7. Comparación de alternativas en base al criterio de proximidad a vías de comunicación.

Alternativas	Fresia	Río Negro	Río Bueno	El Salto
Fresia	1	0,5	0,25	0,333
Río Negro	2	1	0,333	0,333
Río Bueno	4	3	1	1
El Salto	3	3	1	1

Fuente: elaboración propia.

Tabla 8. Comparación de alternativas en función al criterio de costos de los terrenos.

Alternativas	Fresia	Río Negro	Río Bueno	El Salto
Fresia	1	0,5	0,333	0,5
Río Negro	2	1	1	0,5
Río Bueno	3	1	1	1
El Salto	2	2	1	1

Fuente: elaboración propia.

Otro aspecto fundamental de este estudio lo constituye la planificación de las rutas de recolección de los excrementos en las unidades ganaderas.

2.4. Establecimiento de rutas de recolección de excrementos

El planeamiento de los recorridos desde la planta de biogás hacia cada unidad ganadera constituye un problema de ruteo de carga capacitada, CVRP, cuya

función objetivo es la minimización de los costos. Matemáticamente [14]:

$$\min \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N \sum_{k=1}^K c_{ij} X_{ij}^k \quad (6)$$

Sujeto a las restricciones:

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i=0}^N X_{ij}^k = 1 \quad j \in \{1, \dots, N\}; i \neq j \quad (7)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j=0}^N X_{ij}^k = 1 \quad i \in \{1, \dots, N\}; i \neq j \quad (8)$$

$$\sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N X_{ij}^k q_i \leq Q \quad k \in \{1, \dots, K\} \quad (9)$$

$$\sum_{j=1}^N X_{ij}^k \leq 1, i = 0, \quad k \in \{1, \dots, K\} \quad (10)$$

$$\sum_{j=1}^N X_{ji}^k \leq 1, i = 0, \quad k \in \{1, \dots, K\} \quad (11)$$

$$\sum_{j=1}^N X_{ij}^k = \sum_{j=1}^N X_{ji}^k, i = 0, k \in \{1, \dots, K\} \quad (12)$$

donde la expresión (6) define la función objetivo que consiste en minimizar la distancia recorrida asociada a un costo de traslado c_{ij} desde un nodo i hasta un nodo j si, asociado a un vehículo k , hay la posibilidad de emplear dicho vehículo entre tales nodos, X_{ij}^k tomando valores de 1 ó 0. N representa el número de recorridos que minimizan los costos. Las restricciones (7) y (8) expresan que cada recorrido entre dos nodos (unidades ganaderas) i, j debe ser realizado una sola vez por un solo vehículo. La restricción (9) asegura que la cantidad de excrementos de cada recorrido q_i no exceda la capacidad de carga del vehículo, Q . Las restricciones (10) a (12) indican que los vehículos inician y finalizan sus recorridos en la planta de biogás ($i=0$).

El componente costo refleja el dinero por cada kilómetro recorrido por los camiones debido al consumo de combustible, permisos de circulación, honorarios de los conductores, mantenimiento y depreciación de las unidades de transporte y gastos administrativos. Por otro lado, se tienen otros componentes del costo que se refieren a la inversión en infraestructura de la planta y gastos operativos. Se desarrolla en Python un código donde se emplea la heurística de Clarke and White para la determinación de las rutas óptimas. Determinados la ubicación de la planta y las restricciones del ruteo la planificación de las rutas debe ser tal que se pueda garantizar la

recolección de $M_{\text{exc-día}}$ en las unidades ganaderas más próximas. Para ello se estima la existencia de ganado bovino en las unidades ganaderas en función del tamaño de dicha unidad [15]. Con imágenes satelitales del Sistema de Información Rural, SIT rural [16], se obtuvieron las dimensiones de aquellas unidades ganaderas de mayor extensión, y por ende, con mayor probabilidad de tener más cabezas de ganado. Para estimar el número de cabezas de bovinos [17] describe una regla general que consiste en tomar la mitad de la unidad ganadera para labores de pastoreo y cultivo y la otra mitad sin cultivar. De esta mitad comprometida con el cultivo, si se utiliza el 50% se obtienen buenos resultados de rentabilidad ya que las plantas cultivadas poseen el suficiente espacio para la metabolización y restitución de carbohidratos para sus raíces. En cuanto al cultivo de especies forrajeras el éxito de la cosecha dependerá de factores como el suelo, clima y objetivo para el cual se necesita el cultivo de la unidad ganadera [18]. Especies como la alfalfa o *Lolium multiflorum* mantienen rendimientos de entre 12-15 t MS/ha-año y 8-12 t MS/ha-año, respectivamente [19]. Para determinar la cantidad de forraje, Q_{forraje} , se tienen los siguientes parámetros, Tabla 9, y ecuación (13).

Tabla 9. Parámetros de cálculo de cantidad de forraje.

Parámetro	
η_{especie}	Rendimiento de especie de cultivo (t MS ¹ /ha-año) ¹ MS: materia seca.
$A_{\text{unid-gan}}$	Superficie de una unidad ganadera (ha).

Fuente: Morrow, M. [17].

$$Q_{\text{forraje}} = \left(\frac{1}{4}\right) \cdot \eta_{\text{especie}} \cdot A_{\text{unid-gan}} \quad (13)$$

Para determinar el número de bovinos, N_{bov} , se divide la cantidad de forraje disponible entre la cantidad de forraje que ingiere un bovino al cabo del año. Considerando que un bovino adulto consume anualmente 4.270 kg MS/año, se tiene, ecuación (14):

$$N_{\text{bov}} = \frac{Q_{\text{forraje}}}{4270} \quad (14)$$

2.5. Análisis de costos

Se identifican los componentes de los costos de inversión, mantenimiento y de conexión a la red. Dentro de los costos de inversión, C_T , se tienen las variables [12]: costo del sumidero, C_{sum} , costo del sedimentador, C_{sed} , costo del digestor, C_{dig} , costo del separador, C_{sep} , costo de bombeo, C_{pump} , costo de bombeo y calentamiento, $C_{\text{p\&h}}$, costo de compresión, C_{comp} , costo del tanque de almacenamiento de gas, C_{alm} , costo de generación, C_{gen} , y costo del terreno,

C_{ter}. La Tabla 10 muestra los parámetros para obtener los costos de inversión.

Tabla 10. Parámetros para cálculos de costos de inversión.

Parámetro	Descripción
ρ_{sum}	Precio de construcción unitario del sumidero (50,5 US\$/m ³)
ρ_{sed}	Precio de construcción unitario del sedimentador (40,5 US\$/m ³)
ρ_{dig}	Precio de construcción unitario del digestor (25,5 US\$/m ³)
ρ_{pump}	Costo unitario de adquisición de una bomba (126,4 US\$/kW)
$\rho_{p\&h}$	Costo unitario de compra de bomba y administración de calor (150 US\$/kW)
ρ_{comp}	Costo unitario de adquisición de un compresor (185 US\$/m ³)
ρ_{alm}	Costo unitario de construcción tanque almacenamiento gas (800 US\$/m ³)
ρ_{gen}	Costo unitario de adquisición del generador (200 US\$/kW)

Fuente: Younessi et al. [12].

Las ecuaciones que determinan los costos de inversión son, ecuaciones (15) a (23):

$$C_{sum} = \rho_{sum} \cdot V_{sum} \quad (15)$$

$$C_{sed} = \rho_{sed} \cdot V_{sed} \quad (16)$$

$$C_{dig} = \rho_{dig} \cdot V_{dig} \quad (17)$$

$$C_{pump} = \rho_{pump} \cdot P_{pump} \quad (18)$$

$$C_{sep} = \frac{C_{sum}}{6} \quad (19)$$

$$C_{p\&h} = \rho_{p\&h} \cdot P_{p\&h} \quad (20)$$

$$C_{comp} = \rho_{comp} \cdot V_{alm} \quad (21)$$

$$C_{alm} = \rho_{alm} \cdot V_{alm} \quad (22)$$

$$C_{gen} = \rho_{gen} \cdot P_{gen} \quad (23)$$

$$A_{N,i} = \frac{i(i+1)^N}{(i+1)^N - 1} \quad (24)$$

$$C_{mant} = \frac{0,01 \cdot C_T}{A_{N,i}} \quad (25)$$

Los costos de operación y mantenimiento C_{mant} tienen en cuenta los costos totales de inversión, C_T , y factores de recuperación de capital, $A_{N,i}$ para un periodo de N años a la tasa de interés i , ecuaciones (24) y (25).

Los costos de transporte, C_{Trans} , abarcan conceptos como el costo del combustible, C_{comb} , costo de circulación, C_{cir} , honorarios de conductores, C_{hon} , mantenimiento, $C_{mant-veh}$, depreciación, C_{depr} , y costo de administración, C_{adm} [20].

Para el financiamiento se considera una tasa de interés de 9,63 % [21]. El análisis de flujo de caja se plantea para un periodo de 15 años con la tasa de interés

especificada teniendo en cuenta escenarios de financiamiento externo (100%, 50% y 25% de la inversión) y propio. Los ingresos anuales por venta de electricidad, R_{elec} , y por la venta de compostaje, R_{cmpt} , se estiman por medio de las ecuaciones:

$$R_{elec} = \rho_{red} P_{gen} (24) (365) \quad (26)$$

$$R_{cmpt} = \rho_{cmpt} K_{cmpt} N_{bov} \quad (27)$$

donde ρ_{red} es el precio de venta del kilovatio-hora (CLP/kWh) obtenido de [22], P_{gen} es la potencia de generación, 1 MW, ρ_{cmpt} , es el precio unitario del compostaje (CLP/m³) y K_{cmpt} [12] es el compostaje anual estimado que produce cada bovino (m³).

3. Resultados

A partir de la metodología presentada donde se ha estimado el flujo de biogás necesario para alimentar al generador, los requerimientos de producción y almacenamiento de biogás, los criterios de selección de la mejor localización y de las restricciones de la función objetivo que minimiza los costos del proceso de recolección y los costos de instalación y operación de la planta, se desarrollan los resultados.

3.1. Selección de la ubicación de planta

De los criterios analizados, acceso al agua, cercanía a la red eléctrica, cercanía a vías de comunicación y costo de los terrenos el proceso de análisis jerárquico proporcionó como ubicación probable Río Negro con una proporción de 33,80%, seguido de Río Bueno con 30,86%, El Salto con 20,43% y Fresia con 14,91%. La relación de consistencia, CR, fue de 2,13%. De esta forma, terrenos de esta comuna que cumplan con los criterios analizados son posibles candidatos para el proyecto. La capacidad de generación se lograría alcanzar si se cumple con la recolección de la cantidad mínima de excrementos requeridos en las unidades ganaderas más próximas de esta y otras comunas alrededor.

3.2. Capacidad de generación

Para lograr el objetivo de generación de 1 MW son necesarios 350,1 m³/h de biogás. Aplicando las ecuaciones (3) a (5) el volumen del tanque digestor V_{dig} , ha de ser de 21.150 m³, ver Tabla 11.

Tabla 11. Volumen del digestor del proceso.

N_{bov}	$M_{exc-dia}$ (kg/día)	V_{dia} (m ³ /día)	V_{dig} (m ³)
14.100	211.500	440,63	21.150

Fuente: elaboración propia.

Los volúmenes del sumidero V_{sum} y del sedimentador, V_{sed} , son similares equivalentes a $528,75 \text{ m}^3/\text{día}$. El volumen del separador, V_{sep} , representa la sexta parte de los anteriores $88,12 \text{ m}^3$. El volumen neto diario de mezcla de agua y estiércol es de $440,63 \text{ m}^3/\text{día}$. Dados el volumen de biogás estimado proveniente de 1 kg de estiércol y N_{bov} , el volumen estimado de biogás diario, $V_{gas-total}$, se aproxima a $8.460 \text{ m}^3/\text{día}$, equivalentes a $24,16$ horas de suministro al generador descrito a las condiciones de flujo expuestas.

3.3. Rutas de camiones propuestas

De la revisión catastral se seleccionó un conjunto de 27 unidades ganaderas, o nodos de recolección en torno a la población de Río Negro, cuya superficie abarca 14.375 ha y estimando una suma de 14.219 bovinos; esto equivale a la producción de algo más de 211 toneladas de estiércol diarias cantidad suficiente para la generación eléctrica propuesta. Debido a la proximidad entre unidades ganaderas éstas se han agrupado quedando en un conjunto de 13 nodos de recolección, ver Figura 1. En la Tabla 12 se relacionan las coordenadas geográficas de los nodos y la cantidad de estiércol estimado a recolectar totalizando $211,6$ toneladas.

Tabla 12. Coordenadas geográficas de los nodos de recolección.

Nodo	Cantidad estiércol (Ton)	Longitud del nodo	Latitud del nodo
0 (planta)		-40,820	-73,336
1	10,47	-40,735	-73,229
2	10,47	-40,737	-73,186
3	17,79	-40,717	-73,156
4	11,78	-40,955	-73,213
5	21,78	-40,951	-73,582
6	13,04	-40,900	-73,030
7	22,80	-40,904	-73,015
8	18,86	-40,882	-73,490
9	18,96	-40,883	-73,491
10	16,22	-40,915	-73,432
11	9,50	-40,901	-73,352
12	19,07	-40,871	-73,402
13	20,76	-40,947	-73,308

Fuente: Sistema de Información Rural, SIT [16].

Dado que la capacidad de carga de los camiones es de $24,7$ toneladas [22], sería necesario contar con al menos 9 camiones.

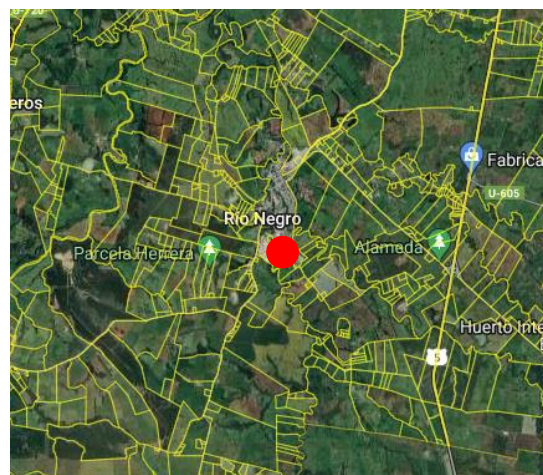


Figura 1 Imagen satelital de Río Negro y alrededores. El punto rojo, población de Río Negro, tiene las coordenadas de la planta (Nodo 0). Fuente: Sistema de Información Rural, SIT [16].

La Figura 2 muestra el recorrido de los camiones que producirían un costo óptimo y la Tabla 13 resume los recorridos de cada vehículo y los costos de transporte asociados.

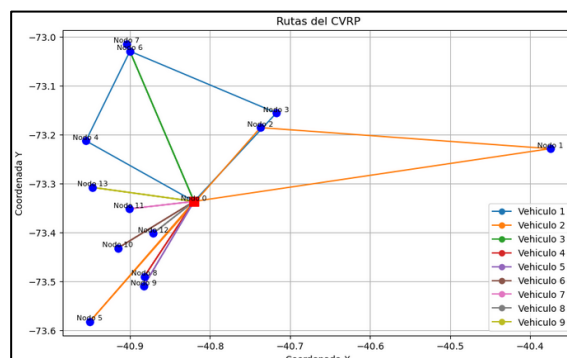


Figura 2 Recorridos de los 9 camiones a los 13 nodos de recolección. Fuente: elaboración propia.

Tabla 13. Recorrido de los vehículos y costo de transporte asociado.

Vehículo	Nodos	Costo diario (\$)
1	0-3-6-4-0	74.421
2	0-5-2-1-0	151.918
3	0-7-0	55.474
4	0-8-0	28.346
5	0-9-0	31.351
6	0-10-0	25.713
7	0-11-0	17.654
8	0-12-0	15.316
9	0-13-0	27.786
Costo total de transporte		427.979

Fuente: elaboración propia.

3.4. Costos

Al aplicar las ecuaciones (15) a (23) se obtienen los costos de inversión, C_T :

Tabla 14. Costos de inversión.

Componente costo de inversión	Cantidad (M CLP)
Costo sumidero, C_{sum}	25,10
Costo sedimentador, C_{sed}	20,13
Costo digestor, C_{dig}	506,97
Costo separador, C_{sep}	4,18
Costo bomba, C_{pump}	4,12
Costo calor y bomba, $C_{h\&p}$	110,90
Costo compresor, C_{comp}	1.192,86
Costo tanque biogás, C_{alm}	6.361,92
Costo generación, C_{gen}	188,00
Costo terreno, C_{ter}	100,00
Costos de inversión, C_T	8.514,18

Fuente: elaboración propia.

Los costos de operación y mantenimiento, C_{mant} , es calculado a partir de las ecuaciones (24) y (25), donde el factor de recuperación de capital a 15 años e interés de 9,63%, $A_{15;0,0963}$, es de 0,13 ver Tabla 15:

Tabla 15. Costos de operación y mantenimiento.

Variable	Valor
$A_{15;0,0963}$	0,13
C_{mant}	661,50 M CLP

Fuente: elaboración propia.

Los costos de transporte (CLP/km), actualizados, se aprecian en la Tabla 16:

Tabla 16. Costos de transporte.

Componente costo de transporte	Cantidad (CLP/km)
Costo de combustible, C_{comb}	497,57
Costo de circulación, C_{cir}	28,78
Costo de honorarios, C_{hon}	292,63
Costo de mantenimiento, $C_{mant-veh}$	51,08
Costo de depreciación, C_{depr}	93,93
Costo de administración, C_{adm}	32,73
Costos totales de transporte, C_{trans}	968,71

Fuente: elaboración propia.

La aplicación de estos conceptos en las rutas se aprecian en la Tabla 13. Los costos de adquisición de los nueve camiones se estiman en 116 M CLP cada unidad [24] con capacidad de carga de 24,7 t. La Tabla 17 resume los costos descritos.

Tabla 17. Resumen de los costos estimados de inversión, operación y mantenimiento, camiones y de capital de trabajo.

Componente costo	Cantidad (M CLP)
(1) Inversión	8.514,18
(2) Operación y mant.	661,50
(3) Camiones	1.044,00
(4) Capital de trabajo	1.911,64
Total costos (1)+(3)+(4)	11.469,82

Fuente: elaboración propia.

De la aplicación de las Ecuaciones (26) y (27) se obtienen los ingresos, R_{ing} , de la planta de biogás, ver Tabla 18.

Tabla 18. Componentes del ingreso de la planta de biogás.

Componente del ingreso	Valor (M CLP)
Venta de electricidad, R_{elec}	1.839,60
Venta de compostaje, R_{cmpt}	1.216,72
Total ingresos, R_{ing}	3.056,32

Fuente: elaboración propia.

Con los datos de los ingresos y costos expuestos se evalúan los escenarios de flujo de caja cuyos resultados se aprecian en la Tabla 19.

Tabla 19. Resultados de flujo de caja de los escenarios considerados.

Escenario	VAN (M CLP)	TIR
Sin financiamiento	12.917,18	11,94
Financiamiento (25%)	10.887,22	5,42
Financiamiento (50%)	8.857,26	-0,24
Financiamiento (100%)	4.797,35	-12,51

Fuente: elaboración propia.

4. Conclusiones

Factores como facilidad de acceso al agua, cercanía a unidades ganaderas y de vías de comunicación y acceso a la red eléctrica son aspectos esenciales para la selección de la ubicación de una planta de producción de biogás para la generación de electricidad. La localidad de Río Negro ha satisfecho los requerimientos por medio de un proceso de análisis jerárquico, AHP. Por otra parte, esta localización facilita el planteamiento de rutas de recolección de los excrementos de ganado de las unidades ganaderas por medio de nueve camiones. La utilización de heurísticas en problemas CVRP facilita la obtención de una solución acorde a las necesidades. La estimación del número de bovinos tiene en cuenta una regla que tanto agricultores como ganaderos

suelen aplicar al dejar una porción del terreno, un 50%, sin faenar; la otra mitad se siembra en una proporción adecuada, siendo 50% aquella que mejores rendimientos ha obtenido. Relacionando las cantidades de cosecha obtenida y lo que consume un bovino se obtiene el número de cabezas que una unidad agrícola podría mantener.

Dado el tipo de generador eléctrico a utilizar, un flujo de biogás debe garantizar su funcionamiento, asegurando una producción continua a través de un proceso anaeróbico con una cantidad de cabezas de ganado bovino acorde al requerimiento. Como consecuencia de la obtención de biogás y su uso la planta podría vender tanto electricidad como residuos de compostaje.

El TIR de la planta es positivo para escenarios sin financiamiento y con financiamiento parcial en torno al 25% indicando la viabilidad de su construcción y puesta en marcha en estas condiciones.

5. Referencias

- [1] Instituto Nacional de Estadísticas, INE, «Encuesta de Ganado bovino 2019,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.ine.gob.cl/estadisticas/economia/agricultura-agroindustria-y-pesca/censos-agropecuarios>. [Último acceso: Febrero 2024].
- [2] I. Vera-Romero, J. Martínez Reyes, M. Estrada Jaramillo y A. Ortiz Soriano, «Potencial de generación de biogás y energía eléctrica. Parte I: excretas de ganado bovino y porcino,» *Ingeniería, investigación y tecnología*, vol. 15, n° 3, pp. 429-436, 2014.
- [3] Instituto Nacional de Estadística, INE, «Producción Pecuaria,» Febrero 2021. [En línea]. Available: <https://regiones.ine.cl/los-rios/estadisticas-regionales/economia/agricultura-agroindustria-y-pesca/produccion-pecuaria>. [Último acceso: Febrero 2024].
- [4] AES Gener, «2020 Memoria anual integrada,» Santiago, 2020.
- [5] Capstone, «Capstone Green Energy,» [En línea]. Available: <https://www.capstonegreenenergy.com/products>. [Último acceso: Febrero 2024]
- [6] Caterpillar, «Caterpillar Electric Power Systems,» [En línea]. Available: https://www.cat.com/en_US/products/new/power-systems/electric-power.html. [Último acceso: Febrero 2024]
- [7] Jenbacher, «Jenbacher Gas Engines,» [En línea]. Available: <https://www.jenbacher.com/en/gas-engines>. [Último acceso: Febrero 2024].
- [8] MAN, «The Power of SNG and biogas,» [En línea]. Available: <https://www.man-es.com/energy-storage/campaigns/sng-biogas-for-power>. [Último acceso: Marzo 2024]
- [9] Wärtsilä, «Wärtsilä 50SG gas engine,» [En línea]. Available: <https://www.wartsila.com/energy/solutions/engine-power-plants/wartsila-50sg-gas-engine>. [Último acceso: Marzo 2024]
- [10] M. J. Barasa Kabeyi y O. Akanni Olanrewaju, «Biogas as a Sustainable Fuel and Feedstock: Properties, Purification, and Applications,» de *From Biomass to Biobased Products - Chapter 22*, IntechOpen, 2023, pp. 1-40.
- [11] R. González, J. García-Cascallana y X. Gómez, «Energetic valorization of biogas. A comparison between centralized and decentralized approach,» *Renewable Energy*, vol. 215, n° 119013, 2023.
- [12] H. Seyed Younessi, S. Bahramara, F. Adabi y H. Golpira, «Modeling the optimal sizing problem of the biogas-based electrical generator in a livestock farm considering a gas storage tank and the anaerobic digester process under the uncertainty of cow dung,» *Energy*, vol. 270, n° 126876, 2023.
- [13] M. T. Varnero Moreno, Manual de Biogás, P. CHI/00/G32, Ed., Santiago de Chile: Ministerio de Energía, 2011.
- [14] U. Dereci y M. Erkan Karabekmez, «The applications of multiple route optimization heuristics and meta-heuristic algorithms to solid waste transportation: A case study in Turkey,» *Decision Analytics Journal*, vol. 4, n° 100113, 2022.
- [15] M. Meehan, K. Sedivec, J. Printz y F. Brummer, «Determining carrying capacity and stocking rates for Range and Pasture in North Dakota,» *NDSU Extension*, vol. R1810, 2018.
- [16] Ministerio de Agricultura , «SIT rural,» [En línea]. Available: <https://www.sitrural.cl/>. [Último acceso: Febrero 2024].
- [17] M. Morrow, «Texas Landowners Association,» [En línea]. Available: <https://landassociation.org/how-many-cows-per-acre-in-texas-get-the-stocking-rate-for-your-area/>. [Último acceso: Mayo 2024].

[18] O. Romero, «Especies y mezclas forrajeras (en línea),» Publicaciones INIA - Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Temuco, 2004.

[19] R. Demanet Filippi, «Manual de especies forrajeras,» CRP Impresores SPA, Concepción, 2019.

[20] Observatorio Logístico, «Observatorio Logístico,» [En línea]. Available: <https://www.observatoriologistico.cl/transporte-carretero/operadores-log%C3%ADsticos/documento/?id=6405e20c110154006a26bbad>. [Último acceso: Marzo 2024].

[21] Banco Central de Chile, «Tasas de interés,» [En línea]. Available: <https://www.bcentral.cl/web/banco-central/areas/estadisticas/tasas-de-interes>. [Último acceso: Julio 2024].

[22] Grupo Saesa, «Saesa-Tarifas vigentes,» [En línea]. Available: <https://www.gruposaes.cl/saes/tarifas-vigentes>. [Último acceso: Mayo 2024].

[23] Hyundai, «api.hyundaicamionesybuses.cl,» [En línea]. Available: <https://api.hyundaicamionesybuses.cl/files/vehiculo/XCIENt%20GT%20Faena%206x4%20+%20EL.pdf>. [Último acceso: Febrero 2024].

[24] Automotriz Vizcaya, «Automotriz Vizcaya,» [En línea]. Available: <https://www.automotrizvizcaya.cl/modelos/xcient-faena-8x4/>. [Último acceso: Mayo 2024].