

ESTUDIO DE PREINVERSION PARA EL DISEÑO DE UN SISTEMA QUE PERMITE EL APROVECHAMIENTO DE GAS METANO ORIGINADO EN EL RELLENO SANITARIO BUCHELLI DEL MUNICIPIO DE TUMACO- NARIÑO.



CAROL LITSY GONZALEZ GUACA

CORPORACIÓN UNIVERSITARIA AUTÓNOMA DEL CAUCA  
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES Y DESARROLLO SOSTENIBLE  
PROGRAMA INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA  
POPAYÁN  
2019

ESTUDIO DE PREINVERSION PARA EL DISEÑO DE UN SISTEMA QUE PERMITE EL APROVECHAMIENTO DE GAS METANO ORIGINADO EN EL RELLENO SANITARIO BUCHELLI DEL MUNICIPIO DE TUMACO- NARIÑO.



CAROL LITSY GONZALEZ GUACA

Trabajo de Grado, en modalidad pasantía para optar al título de Ingeniería Ambiental y Sanitaria

Director Pasantía  
M.S.c RONALD EDINSON CERON

CORPORACIÓN UNIVERSITARIA AUTÓNOMA DEL CAUCA  
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES Y DESARROLLO SOSTENIBLE  
PROGRAMA INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA  
POPAYÁN  
2019

## NOTA DE ACEPTACIÓN

Una vez revisado el documento final del trabajo de grado titulado “Estudio de Pre inversión para el Diseño de un Sistema que permite el Aprovechamiento de Gas Metano Originado en el Relleno Sanitario Buchelli del Municipio de Tumaco- Nariño.”; realizado por la alumna Carol Litsy González Guaca se autoriza la sustentación del mismo para optar al título Profesional en Ingeniería Ambiental y Sanitaria.

---

Director  
Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria  
Corporación Universitaria Autónoma del Cauca

---

Jurado 1  
Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria  
Corporación Universitaria Autónoma del Cauca

---

Jurado 2  
Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria  
Corporación Universitaria Autónoma del Cauca

Popayán, Junio 18 de 2019

## DEDICATORIA

Este trabajo de grado va dedicado a la virgen de las lajas, a mi mamá que fue mi fortaleza infinita en los peores momentos siempre creíste en mí, a mi papá este título te pertenece completo cada logro en mi vida es por ti, por tus largas jornadas de trabajo pensando en mi educación hoy estoy aquí gracias a ti, a mi luchito eres mi inspiración, mi wiquiwiqui por tu apoyo emocional y escuchar mis largas explicaciones una y otra vez por alegrarte con mis aciertos y sentirte triste con mis malos días. Para toda mi familia (tíos y primas), mi mami Carmen la fe que siempre tienes en mí .Y todos aquellos que piensan que es imposible espero sirva de motivación

## **AGRADECIMIENTOS**

A DIOS por regalarme salud cada día para alcanzar mis metas, A la empresa AGUAS DE TUMACO por la oportunidad, a mis Supervisores (Duvan, Camilo, Nacar).A mi director y Amigo Ronald Cerón y a todas esas personas que compartieron conmigo sus conocimientos.

Infinitas Gracias.

## TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
<b>RESUMEN</b> .....	¡Error! Marcador no definido.
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>13</b>
<b>INTRODUCCIÒN</b> .....	<b>14</b>
<b>CAPITULO I: PROBLEMA</b> .....	<b>15</b>
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	<b>15</b>
1.2 JUSTIFICACIÒN.....	<b>16</b>
1.3 OBJETIVOS.....	<b>17</b>
1.3.1 Objetivo General .....	17
1.3.2 Objetivos Específicos.....	17
<b>CAPITULO II: MARCO TEORICO</b> .....	<b>18</b>
2.1 ANTECEDENTES.....	<b>18</b>
2.2 BASES TEORICAS.....	<b>20</b>
2.2.1 Generación del biogás .....	20
2.2.2 Características del Biogás .....	21
2.2.3 Efectos en el ambiente.....	21
2.3 BASES LEGALES.....	<b>23</b>
<b>CAPITULO III: METODOLOGÌA</b> .....	<b>26</b>
3.1 DESCRIPCION DEL AREA DE ESTUDIO.....	<b>24</b>
3.2 FASE I) CARACTERIZACIÓN DEL BIOGÁS QUE SE GENERA EN EL RELLENO SANITARIO BUCHELI Y CRUZAR ESTA INFORMACIÓN CON LOS	

DATOS HISTÓRICOS LO QUE PERMITIRÁ LA CUANTIFICACIÓN REAL DEL BIOGÁS. ....	26
3.3 FASE II) ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DEL SUELO QUE GARANTICEN UNA PRODUCCIÓN CONSTANTE DEL BIOGÁS .....	30
3.4 FASE III) SOCIALIZACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL PROYECTO A FUNCIONARIOS DE LA EMPRESA AGUAS DE TUMACO Y LA COMUNIDAD TUMAQUEÑA MÉTODOS QUE CONTRIBUYERON A DAR CUMPLIMIENTO AL OBJETIVO GENERAL DEL PROYECTO.....	32
<b>CAPITULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>33</b>
4.1 FASE I) CARACTERIZACIÓN DEL BIOGÁS QUE SE GENERA EN EL RELLENO SANITARIO BUCHELI Y CRUZAR ESTA INFORMACIÓN CON LOS DATOS HISTÓRICOS LO QUE PERMITIRÁ LA CUANTIFICACIÓN REAL DEL BIOGÁS. ....	33
4.2 FASE II) ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DEL SUELO QUE GARANTICEN UNA PRODUCCIÓN CONSTANTE DEL BIOGÁS. ....	44
4.3 FASE III) SOCIALIZACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL PROYECTO A FUNCIONARIOS DE LA EMPRESA AGUAS DE TUMACO Y LA COMUNIDAD TUMAQUEÑA MÉTODOS QUE CONTRIBUYERON A DAR CUMPLIMIENTO AL OBJETIVO GENERAL DEL PROYECTO.....	47
<b>CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>60</b>
5.1 CONCLUSIONES .....	60
5.2 RECOMENDACIONES.....	61
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>62</b>

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Normatividad.....	23
Tabla 2.Ubicación de los puntos seleccionados .....	27
Tabla 3.Proyección de residuos.....	36
Tabla 4.Proyección de la generación de biogás .....	37
Tabla 5.Promedio de Residuos Sólidos. ....	39
Tabla 6. Parámetros según el Ancho del Rollo .....	41
Tabla 7.Sección Eficaz según el ancho del rollo.....	42
Tabla 8. Longitud del Biodigestor según el ancho del rollo.....	42
Tabla 9. Longitud del Biodigestor según el ancho del rollo.....	43
Tabla 10.Dimensiones de la zanja del Biodigestor .....	43
Tabla 11.Dimensiones de la zanja del Biodiverso.....	43
Tabla 12.Parámetros químicos .....	48
Tabla 13. CAPTACION DEL GAS EN LA CELDA .....	51
Tabla 14. Incremento de la AIU .....	52
Tabla 15. Incremento de la IUA .....	52
Tabla 16.Ganancias anuales de captación forzada .....	52
Tabla 17. Proyección salario operador por 8 años.....	53
Tabla 18.Costo mantenimiento semestral.....	53
Tabla 19. Amortización de la captación forzada .....	54
Tabla 20. Utilidad de la captación forzada .....	54
Tabla 21. Diseño del Biodigestor .....	55

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Ubicación de la Zona de Estudio. ....	24
Figura 2. Determinación de los gases de cada una de las fuentes Fijas .....	27
Figura 3. Caracterización de Residuos Sólidos. ....	29
Figura 4. Localización de las Exploraciones .....	30
Figura 5. Perforación del suelo .....	31
Figura 6. Comparación de Niveles de CH <sub>4</sub> a través de los años. ....	33
Figura 7. Comparación de Niveles CO <sub>2</sub> de a través de los años. ....	34
Figura 8. Comparación de Niveles O <sub>2</sub> de a través de los años. ....	35
Figura 9. Caracterización del biogás año 2018. ....	35
Figura 10. Proyección de la Generación de Biogás – Relleno Sanitario Buchelli .....	39
Figura 11. Caracterización Física de los Residuos. ....	40
Figura 12. Variación del porcentaje pasa tamiz No. 200 con la profundidad .....	44
Figura 13. Variación del porcentaje pasa tamiz No. 200 con la profundidad ....	45
Figura 14. Análisis de la plasticidad de los materiales .....	45
Figura 15. Variación de la resistencia a la compresión inconfiada con la profundidad .....	46
Figura 16. Curvas de ensayo de resistencia a la compresión inconfiada .....	47
Figura 17. Análisis estadístico de la resistencia al corte no drenado. ....	47
Figura 18. Valores de pH .....	48
Figura 19. Valores de Potasio .....	49
Figura 20. Valores de Hierro .....	49
Figura 21. Valores de Manganeso .....	50
Figura 22. Valores de Calcio .....	50

Figura 23. Esquema de Clasificación de Residuos Solidos .....	57
Figura 24. Socializacion del proyecto a la comunidad. ....	57

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
Anexo 1.Muestras de suelo para Análisis Físicoquímico. ....	67
Anexo 2. Caracterización de Residuos Sólidos. ....	67
Anexo 3. Estaciones de Monitoreo para la Caracterización del Biogás. ....	68
Anexo 4.Replanteo del Terreno. ....	69
Anexo 5. Excavación. ....	70
Anexo 6.Excavación Corte Longitudinal. ....	71
Anexo 7.Colocación Muros del Ladrillo.....	72
Anexo 8.Colocación del Biodigestor. ....	73
Anexo 9.Conexiones.....	74

## RESUMEN

La presente investigación tuvo por objeto formular un estudio de pre inversión para el montaje de un sistema de biodigestion con el fin de aprovechar el gas metano originado en el relleno sanitario Buchelli del municipio de Tumaco-Nariño. Para el desarrollo del análisis se realizó la caracterización del biogás mediante la medición de gases como CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, para ello se utilizó como herramienta el sensor electroquímico de marca Sewerin Multitec 540 de fabricación alemana.

En los resultados obtenidos en la caracterización del biogás en el relleno sanitario Buchelli, se identificaron grandes concentraciones de metano en el año 2018, además de que su proyección de generación desde el año 2012 hasta el tiempo de su vida útil (2022) se estima que será de 24.000-33.544 m<sup>3</sup>/año, razón por lo cual se ha decidido realizar el aprovechamiento mediante el uso de un Biodigestor. En cuanto a las dimensiones del Reactor (Biodigestor) se tuvo en cuenta las dimensiones aplicadas por (Cedecap,2011) en su guía de diseño y manual sobre la instalación de un Biodigestor en donde especifica las medidas más adecuadas para su construcción.

Finalmente se hizo una socialización de los resultados del proyecto a funcionarios de la empresa aguas de Tumaco y la comunidad en general. La información que se les suministro se basó en explicarles que en el relleno sanitario Buchelli se realiza la disposición final de residuos sólidos domiciliarios, industriales y comerciales mediante su depósito definitivo en el suelo. De esta forma el sitio de disposición final le da solución a las necesidades de evacuación de alrededor de 24.441.625 kilogramos anuales de residuos provenientes de 7 municipios entre los cuales se encuentra Tumaco, Llorente, candelilla, imbili, tanga real, espriella, palmeira y pueblo nuevo.

Palabras claves: Biodigester, gases, sanitary landfill, socialization, design.

## ABSTRACT

The purpose of the present research was to formulate a pre-investment study for the setting of a system such as the Biodigester, in order to take advantage of the methane gas produced in the Bucheli sanitary landfill, in the municipality of Tumaco-Nariño. For the development of this study, the characterization of the biogas was carried out by measuring gases such as: CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, for which the electrochemical sensor of the Sewerin Multitec 540 brand of German manufacture was used as a tool.

The obtained results during the project development there were as follows: in the characterization of the Biogas, it is identified that the Bucheli landfill has generated large concentrations of methane in 2018, in addition to its generation projection from 2012 to the time of its useful life (2022) it is estimated that it will be 24,000-33-544 m<sup>3</sup> / a year, in terms of the design of the Biodigester, the Biodigester design was carried out, regarding the dimensions of the Reactor (Biodigester), the dimensions applied by (Cedecap, 2011) in his design guide and manual on the installation of a Biodigester, were taken into account, where he specifies the most suitable measures for a Biodigester construction.

Finally, a socialization of the results of the project was made to officials of the Aguas de Tumaco company and the community in general. The information provided was based on explaining that the final disposal of residential, industrial and commercial solid waste is carried out at the Buchelli landfill through its final deposit on the ground. In this way, the final disposal site gives solution to the evacuation needs of around 24,441,625 kilograms of waste per year from 7 municipalities, including candelilla, imbili, tanga real, espriella, palmeira y pueblo nuevo.

Keywords: Biodigester, gases, characterization, socialization, Plans.

## INTRODUCCIÓN

Los rellenos sanitarios se constituyen como la tercera fuente global, antropogénica de producción de metano en el mundo, siendo las minas de carbón y la agricultura las principales fuentes, razón por la cual aprovechamiento del metano se ha establecido en el mercado como una iniciativa internacional con el fin de promover la recuperación en el corto plazo del gas CH<sub>4</sub> y su uso como fuente de energía limpia y viable [1].

El metano es un hidrocarburo (CH<sub>4</sub>) y es el componente primario del biogás, forma parte de los gases de efecto invernadero (GEI=GHG) y su presencia en la atmósfera contribuye al cambio climático, es derivado de los rellenos sanitarios y se sabe que es producido por la biodegradación en condiciones anaerobias de la fracción orgánica de los residuos sólidos depositados en los rellenos sanitarios o sitios de disposición final [2].

La producción de biogás en las primeras etapas de vida de un relleno sanitario puede ser mínima durante varios meses, sin embargo, en rellenos sanitarios con una vida útil media o recientemente clausurado la producción se puede encontrar en su máxima capacidad, tardando varios años en dejar de producir este biogás, incluso aun después de clausurado el relleno [3]. Se ha estimado de forma teórica que la cantidad de biogás generado a partir de una tonelada de carbono biodegradable equivale a 1868 Nm<sup>3</sup> (Normal = Nm<sup>3</sup> de metros cúbicos).

Razón por la cual actualmente más de 20 países socios y 650 miembros individuales de diversas dependencias de gobierno, entidades del sector privado, bancos de desarrollo, organizaciones no gubernamentales, expertos técnicos y financieros y otros grupos interesados, se han unido a la iniciativa y colaboran para desarrollar proyectos de captura y uso de metano [4], con el fin de reducir las emisiones de CH<sub>4</sub>, propiciar el crecimiento económico, fortalecer la disponibilidad de energía, mejorar la calidad del aire, mejorar la seguridad industrial y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

Es importante mencionar que el gas recuperado puede utilizarse de diferentes maneras, por ejemplo: producción de energía eléctrica a través del uso de generadores de combustión interna, turbinas, o micro turbinas o puede utilizarse como combustible en calentadores de agua u otras instalaciones, incluso, con el tratamiento y las medidas adecuadas, puede destinarse para el uso del consumidor final, en el hogar, en sustitución de las fuentes de energía empleadas en la cocción de alimentos [5].

## CAPITULO I: PROBLEMA

### 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los rellenos sanitarios surgen como respuesta a la problemática generada por la producción de residuos sólidos urbanos, Sin embargo en la actualidad estos sitios de disposición final, son considerados fuentes emisoras de contaminantes atmosféricos como material biológico, gases y otros productos de degradación de desechos orgánicos, constituyendo una importante fuente antropogénica de generación de gases invernadero, representada por el biogás producto de la descomposición biológica de la materia orgánica, que contiene metano ( $\text{CH}_4$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y trazas de compuestos orgánicos volátiles (COV) [12].

De todos estos gases, el gas metano es el de mayor interés porque, a pesar de ser inodoro e incoloro, es inflamable y explosivo si se concentra en el aire en una proporción de 5 a 15% en volumen; los gases tienden a acumularse en los espacios vacíos dentro del relleno y aprovechan cualquier fisura del terreno o permeabilidad de la cubierta para salir. Cuando el gas metano se acumula en el interior del relleno y migra a las áreas vecinas, puede generar riesgos de explosión, su producción varía dependiendo de la antigüedad del sitio de disposición, por el avance de los procesos de estabilización de los residuos, y de las condiciones ambientales en las que se efectúan [13].

El metano es el segundo mayor contribuyente al calentamiento global entre los gases de efecto invernadero, después del dióxido de carbono; el potencial de calentamiento global del metano (en un horizonte temporal de 100 años) es 21 veces mayor que el del dióxido de carbono. Las emisiones de metano a largo plazo, aumentarían su concentración en el ambiente, de forma que se convertiría en un problema mayor por su alta contribución al efecto invernadero [8], el incremento en la generación de ozono troposférico, la disminución de la concentración del radical hidroxilo y el aumento en el tiempo de residencia de algunos Compuestos Orgánicos Volátiles [14].

Un claro ejemplo de un relleno que presenta esta problemática de afectación ambiental en la actualidad, es el relleno Buchelli del Municipio de Tumaco-Nariño que emite a la atmosfera el Biogás que es producto de la descomposición de los residuos allí dispuestos, el gas generado en el relleno se compone principalmente de metano y Dióxido de Carbono que son gases que pueden contribuir en el aumento de los gases de efecto invernadero lo que afectaría directamente en el calentamiento global, además de ello la concentración de estos gases en la atmosfera puede ocasionar en el peor de los casos graves explosiones [15].

Es por ello que el biogás que se genera inevitablemente por causas normales en los rellenos sanitarios, puede ser capturado mediante la utilización de un Biodigestor con el objetivo de reducir eficazmente las emisiones de metano y evitar así aumentar su concentración en el ambiente. Es importante mencionar que el gas recuperado puede usarse de diferentes maneras, por ejemplo:

producción de energía eléctrica a través del uso de generadores de combustión interna, turbinas, o micro turbinas o puede utilizarse como combustible en calentadores de agua [16].

## **1.2 JUSTIFICACIÓN**

El biogás que se genera inevitablemente por causas normales en el relleno sanitario Buchelli ubicado en el municipio de Tumaco Nariño, puede ser capturado mediante la utilización de un Biodigestor con el objetivo de reducir eficazmente las emisiones de metano y evitar así aumentar su concentración en el ambiente, es importante mencionar que el gas recuperado puede usarse de diferentes maneras entre ellas se encuentra la producción de energía eléctrica a través del uso de generadores de combustión interna, turbinas, o micro turbinas o puede utilizarse como combustible en calentadores de agua o como gas natural.

Cabe resaltar que el desarrollo del proyecto en cuanto a la generación del biogás en esta zona del país causaría un impacto social muy importante porque, traería beneficios inmensos para toda la población, especialmente ahora que Tumaco ha entrado a la era del postconflicto; puesto que ayudaría a muchas familias en la economía del hogar a obtener un combustible más económico y amigable con el medio ambiente. Además que trae otros beneficios como mejoras en la calidad del aire (reducción de los malos olores), estabilidad geotécnica de la masa de residuos, minimización del riesgo de incendios, entre otros.

Finalmente resulta de gran interés continuar con el desarrollo de los biocombustibles con el objeto de obtener mejores rendimientos y calidad en cuanto a su producción, reduciendo a su vez la contaminación ambiental producida por los RSU y así continuar originando el desarrollo de tecnologías y de igual forma la transferencia de las mismas al sector privado, social y público. De acuerdo a lo mencionado anteriormente el aprovechamiento del Biogás se convierte en un proyecto MDL de importancia significativa para el relleno sanitario, debido a que ayuda a reducir las emisiones de GEI, elimina el desarrollo de la actividad basada en la quema del biogás la cual anteriormente era la solución más simple a la reducción de las emisiones de metano

## **1.3 OBJETIVOS**

### **1.3.1 Objetivo General**

Realizar estudio de pre inversión para el diseño de un sistema que permite el aprovechamiento de gas metano originado en el relleno sanitario Buchelli del municipio de Tumaco- Nariño.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Realizar una caracterización del biogás que se genera en el relleno sanitario Buchelli y cruzar esta información con los datos históricos lo que permitirá la cuantificación real del biogás.
- Analizar los parámetros físico-químicos del suelo que garanticen una producción constante de biogás.
- Realizar un análisis técnico y financiero sobre el diseño del sistema de aprovechamiento del gas con el fin de socializarles todos los resultados obtenidos del proyecto a los funcionarios de la empresa aguas de Tumaco y la comunidad tumaqueña.

## CAPITULO II: MARCO TEORICO

### 2.1 ANTECEDENTES

A nivel internacional, nacional y local hay muchos países que han aplicado y desarrollado muchos métodos y modelos que han sido desarrollados para proyectar el potencial de generación del biogás, permitiendo calcularla el potencial de generación de electricidad a partir del biogás producido en estos sitios de disposición final, ejemplo de ello son:

A nivel internacional en el año 2002, en México con el apoyo del Banco Mundial y el programa Energy Sector Management Assistance Programme (ESMAP), se desarrolló un proyecto para la captura y aprovechamiento del biogás proveniente del Relleno Sanitario “Salinas Victoria” ubicado en Monterrey. Dicho proyecto comprende la captación de biogás de la celda 44 ya clausurada donde se depositaron 7.7 millones de toneladas de residuos desde 1991 hasta 1999, dicho relleno aun recibe residuos. Se estimó que la producción de biogás podría generar aproximadamente 700 GWh de energía, la cual sería destinada a las necesidades de consumo de la red de alumbrado público y bombeo de agua potable y residual de la ciudad de Monterrey, mediante la figura de empresa cogeneradora. Finalmente se determinó una capacidad total de 7 MW efectivamente instalada, mediante la utilización de motores de combustión interna [19].

En Chile encontramos cinco (5) rellenos sanitarios, de los cuales se extrae en promedio 4 millones de m<sup>3</sup> con un poder calorífico superior a 5000 kcal/m<sup>3</sup>. Dicho biogás es tratado, inyectado y mezclado con el gas natural para posteriormente ser distribuido por la red de tuberías para consumo doméstico, llegando a cubrir un 40% de la demanda de este combustible en la ciudad. A continuación encontramos las características de los rellenos sanitarios (RS) [20].

NOMBRE	AREA	CAPACIDAD DE DISPOSICIÓN	CANTIDAD DE BIOGÁS EXTRAÍDO
El Molle	86.5 ha	3.3 millones de ton.	N.A
La Feria	30 ha	3.9 millones de ton	1.14 Millones m <sup>3</sup> /año
Lo Errazuriz	40 ha	1.17 millones de ton.	4.5 Millones m <sup>3</sup> /año
Lepanto	85 ha	3.9 millones de ton.	1.2 Millones m <sup>3</sup> /año

En Uruguay con ayuda de la financiación parcial por parte del Banco Mundial, el departamento de Maldonado ha realizado un proyecto de aprovechamiento de biogás del RS “Las Rosas”, cuyo objetivo inmediato es demostrar la posibilidad de recuperar y utilizar el biogás de un relleno con beneficios energéticos y evitar las emisiones de GEI a la atmósfera. En el estudio de pre – factibilidad se desarrollaron alternativas de generación de energía (2 MW) y destrucción térmica del biogás, ambas alternativas resultaron viables, dependiendo de los escenarios planteados por el proyecto. El sitio de disposición final “Las Rosas” posee un área de 19 ha, donde se pueden disponer aproximadamente 160.000 toneladas de residuos, actualmente en Maldonado se disponen 52.200 ton/año de residuos [22].

En el Relleno Sanitario “La Bonanza”, en cual se disponen residuos provenientes de la ciudad de Caracas-Venezuela, se ha instalado y se encuentra en operación la primera etapa de un sistema de captación y destrucción térmica que procesa aproximadamente 3.900 m<sup>3</sup>/h de biogás con un contenido medio de 35% de metano. El potencial del relleno por los próximos 20 años es de aproximadamente 12.000 m<sup>3</sup>/h. En el momento se está finalizando el diseño de la segunda etapa que permitirá captar todo el biogás generado. De igual forma, existe un proyecto, el cual ha sido sometido a consideración de las autoridades para aprovechar el potencial de la Bonanza, para instalar entre 16 y 20 MW, suficiente para abastecer a 60.000 personas con energía eléctrica [23].

En el Relleno Sanitario “Río Azul”, ubicado al sudeste de San José de Costa Rica se llevó a cabo un proyecto de aprovechamiento del biogás, para la generación de 3.5 MW de potencia firme y la generación de 25 GWh anuales. Dicho proyecto se inició por medio de licitación pública adjudicándose el proceso de construcción, mantenimiento y operación al grupo corporativo SARET desde el año 2003 con un período contractual de 10 años buscando reducir aproximadamente 700.000 toneladas de CO<sub>2</sub> y se encuentra en proceso de presentación ante el MDL [24].

A nivel Nacional en Colombia en el relleno sanitario La Glorita ubicado en Pereira, a una altura de 1423 m sobre el nivel del mar, con una temperatura media de 21<sup>a</sup>C y una precipitación promedio de 2750 mm/año. Esto lo que hace un ambiente óptimo para el proceso de descomposición anaerobia y aumentando la producción de biogás en el relleno. (Occidental de Construcciones S.A., 1998). En el que se llevó a cabo un cálculo de emisiones en sitios de disposición en forma individual y se hizo la predicción de la generación de biogás durante la vida útil del relleno sanitario utilizando datos de entrada específicos. Adicionalmente se pudo establecer las toneladas equivalentes de CO<sub>2</sub> reducidas por la captura e incineración del biogás de vertedero por medio de la expresión (2), donde se puede establecer el aporte ambiental en un proyecto de esta categoría, con la fórmula:

$$T = CO_2eq = \%V_{CH_4} * 21 * Q_{BG} * P_{CH_4}$$

Dónde:

*T CO<sub>2</sub>eq = Toneladas totales generadas de CO<sub>2</sub> equivalente.*  
*%V CH<sub>4</sub> = Porcentaje del volumen estimado de metano en el biogás.*  
*Q<sub>BG</sub> = Cantidad total de biogás estimado [Ton/año].*  
*ρ<sub>CH<sub>4</sub></sub> = Densidad del metano = 0.0007168 [Ton/m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>].*

Es de anotar que con la aplicación del modelo planteado se obtiene un valor estimado de la generación de metano, pero ese resultado no implica que sea el total de metano que puede ser captado, ya que depende de la eficiencia del sistema de recuperación en el momento de la recolección y extracción del biogás. Los valores típicos de eficiencia de los sistemas de recuperación de biogás se encuentran entre el 50 y 80% [17].

A nivel local en Medellín, por ejemplo se produce biogás en la planta de tratamiento de aguas residuales San Fernando, donde se limpian las aguas del río Medellín, así como también en el Relleno Sanitario de La Pradera, encargado del tratamiento de residuos urbanos de la región. Desafortunadamente algunos índices de recuperación de biogás se ven afectados por: condiciones inapropiadas del sitio, instalación parcial del sistema, causa común de baja eficiencia de captura y falta de experiencia con la operación de los sistemas de captura de biogás [18].

En el Relleno Sanitario “Olavarría”, ubicado en la municipalidad de Olavarría; durante el año de 2002, mediante un convenio firmado entre la municipalidad, el parque Industrial y la Facultad de Ingeniería se desarrolló un estudio de recuperación y aprovechamiento del biogás proveniente del relleno sanitario incluyendo el MDL. Este proyecto involucra aspectos técnicos como la extracción, conducción, succión, destrucción térmica del biogás y manejo de condensados. El Relleno Sanitario inició operaciones en 1999, tiene un área total de 34 ha con una capacidad final de 1,000.000 de toneladas. Asimismo el estudio determinó que un 71% de los residuos son materia orgánica, lo cual genera una cantidad apreciable de biogás, consiguiéndose una tasa promedio de captura de biogás de 282 m<sup>3</sup>/h durante un período de 21 años, donde se espera reducir aproximadamente 17.302 ton CO<sub>2</sub>e (promedio anual), estos datos fueron determinados a partir del modelo Scholl Canyon (Degradación de Primer Orden) para la estimación de generación de biogás [21].

## **2.2 BASES TEORICAS**

### **2.2.2 Generación del biogás**

Para que un relleno sanitario genere biogás es necesario que los residuos sólidos depositados contengan materia orgánica, y que haya condiciones para la descomposición anaerobia; es decir que los gases que allí se encuentren incluyan amoníaco (NH<sub>3</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), hidrógeno (H<sub>2</sub>), sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S), metano (CH<sub>4</sub>), nitrógeno (N<sub>2</sub>) y oxígeno (O<sub>2</sub>). El metano y el dióxido de carbono son los principales gases procedentes de la descomposición anaerobia de los componentes biodegradables de los residuos orgánicos en los Rellenos sanitarios [25].

El biogás se produce de la descomposición de los materiales orgánicos, siendo un proceso por descomposición anaerobia. Los dos principales gases formados son metano (CH<sub>4</sub>) y bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). El gas metano puede aprovecharse como fuente de energía lo que haría una producción limpia y una energía renovable siendo amigable con el medio ambiente y creando conciencia ciudadana [26].

Hay numerosos modelos disponibles para calcular la producción del gas de un relleno sanitario. Todos estos modelos pueden ser usados para elaborar una curva de generación que permita predecir su comportamiento a lo largo del

tiempo. La totalidad del gas existente y la tasa a la cual es generado puede variar de alguna manera según los diferentes modelos que se usen, no obstante, el parámetro de entrada que es común a todos ellos es el de la cantidad de residuos que son degradables [27].

### **2.2.2 Características del Biogás**

Los principales componentes del biogás generado en los residuos sólidos son el metano y el dióxido de carbono, además en bajas concentraciones se tiene nitrógeno y ácido sulfhídrico; sin embargo, existen otros componentes a nivel traza que son importantes por sus posibles efectos sobre la salud humana. En lo que respecta a los compuestos a nivel traza estos provienen de dos posibles fuentes:

a) Los generados por el proceso de biodegradación natural que se presenta en los sitios de disposición final. En esta fuente se tiene a los siguientes grupos:

- Compuestos Oxigenados.
- Compuestos de azufre.
- Hidrocarburos [28].

b) Los generados artificialmente por el hombre y que son depositados con los residuos sólidos. En esta fuente se tiene a los siguientes grupos:

- Hidrocarburos Aromáticos.
- Hidrocarburos Clorados.

De estos grupos, en los Estados Unidos de América se han identificado compuestos en el biogás cuyas características se asocian con propiedades carcinogénicas. En nuestro país, no se cuenta con suficiente información al respecto, sin embargo, se han realizado caracterizaciones de biogás de manera aislada detectando los siguientes compuestos: Octano. • Nonano. • 3-Metil Nonano. • Decano. • Metil Benceno. • 1,2-Dimetil Benceno. • 1,3-Dimetil Benceno. • Metil 4 (1-Metil etil) Benceno. • 1,3,5-Trimetil Benceno. • Limoneno. • Alfa-Pireno [29].

### **2.2.3 Efectos en el ambiente**

La producción del biogás crea en el interior del relleno una sobrepresión que provoca su difusión a través de los estratos hasta alcanzar la atmósfera, la cual es controlada por la variación meteorológica de la presión atmosférica del exterior. La instalación de sistemas de captación, según el diseño realizado, puede provocar la introducción de aire en el interior del relleno, modificando así los procesos de fermentación. El biogás generado, se libera a la atmósfera [30].

En relación a ello, los principales impactos provocados por los gases son:

- Efectos sobre la salud humana por frecuente explosión, debido a la presencia de compuestos orgánicos, entre los que se cuenta solventes, plaguicidas, volátiles clorados, entre otros [31].

- Emisión de olores por efecto de mercaptanos y compuestos orgánicos [32].

- Deterioro de la vegetación colindante, debido a la migración lateral del biogás.

- Riesgos de explosión o asfixia en lugares cerrados, tales como pozos de visita, ductos, sistemas de alcantarillado, por efecto de la migración lateral [33].

- Inestabilidad en sitios de disposición fina de residuos, cuando no se cuenta con sistemas de extracción o venteo [34].

### 2.3.4 Biodigestor

Un digestor de desechos orgánicos o biodigestor en su forma más simple, es un contenedor cerrado, hermético e impermeable (llamado reactor), dentro del cual se deposita el material orgánico a fermentar (excrementos de animales y humanos, desechos vegetales, etcétera) en determinada dilución de agua para que se descomponga, produciendo gas metano y fertilizantes orgánicos ricos en nitrógeno, fósforo y potasio.

Este sistema también puede incluir una cámara de carga y nivelación del agua residual antes del reactor, un dispositivo para captar y almacenar el biogás y cámaras de presión hidrostática y postratamiento (filtro y piedras, de algas, secado, entre otros) a la salida del reactor. Principales Biodigestores existentes:

- Biodigestor de domo flotante.
- Biodigestor de domo fijo.
- Biodigestor de estructura flexible.
- Biodigestor flotante.
- Biodigestor con tanque de almacenamiento tradicional y cúpula de polietileno.
- Biodigestores de alta velocidad o flujo inducido.
- Instalaciones industriales de biodigestión.

**Biodigestor del domo flotante (India):** Este biodigestor consiste en un tambor, originalmente hecho de acero pero después reemplazado por fibra de vidrio reforzado en plástico (FRP) para superar el problema de corrosión. Normalmente se construye la pared del reactor y fondo de ladrillo, aunque a veces se usa refuerzo en hormigón. Se entrapa el gas producido bajo una tapa flotante que sube y se cae en una guía central. La presión del gas disponible normalmente varía entre 4 a 8 cm. de columna de agua.

**Biodigestor de domo fijo (China):** Consiste en una firme cámara de gas construida de ladrillos, piedra u hormigón. La tapa y la base son semiesferas y son unidos por lados rectos. La superficie interior es sellada por muchas capas delgadas para hacerlo firme. Hay un tapón de inspección en la cima del digestor que facilita el limpiado. Se guarda el gas producido durante la digestión bajo el domo con presiones entre 1[m] y 1.5 [m] de columna de agua. Esto crea fuerzas estructurales bastante altas y es la razón para la forma semiesférica. Se necesitan materiales de alta calidad y recursos humanos costosos para construir este tipo de biodigestor. Más de cinco millones de biodigestores se han construido en China y ha estado funcionando correctamente pero, la tecnología no ha sido popular fuera de China.

**Biodigestor con tanque de almacenamiento tradicional y cúpula de polietileno:** Otro tipo de planta de producción de biogás que ha logrado disminuir los costos hasta 30% con respecto a los prototipos tradicionales, es la que se

caracteriza por tener una estructura semiesférica de polietileno de película delgada en sustitución de la campana móvil y la cúpula fija y un tanque de almacenamiento de piedra y ladrillo como los empleados en los prototipos tradicionales.

## 2.3 BASES LEGALES

Como se puede observar en la tabla 1, El estudio de preinversión para el diseño de un sistema que permite el aprovechamiento de gas metano originado en el relleno sanitario Buchelli del municipio de Tumaco- Nariño, está estructurada bajo las normas que determina los parámetros básicos en el diseño de los rellenos, favoreciendo la estimación potencial de metano y el aprovechamiento del biogás [31].

Tabla 1. Normatividad.

ALCANCE	REFERENCIA NORMATIVA	MARCO LEGAL
INTERNACIONAL	Ley 164 de 1994.	“Por medio de la cual se aprueba la “Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático”, hecha en Nueva York el 9 de mayo de 1992, entrando en vigor el 21 de marzo de 1994.
	Decreto 2811 de 1974.	“Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente”.
	Ley 812 de 2003	“Mediante la cual se adopta el Plan Nacional de Desarrollo particularmente en lo pertinente a energía”.
	Ley 697 de 2001.	“Mediante el cual se fomenta el uso racional y eficiente de la energía, se promueve el uso de energías alternativas y se dictan otras disposiciones”.
	Resolución 0453 de Abril 27 de 2004	“Por la cual se adoptan los principios, requisitos y criterios y se establece el procedimiento para la Aprobación Nacional de proyectos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero que optan al Mecanismo de desarrollo Limpio – MDL”
NACIONAL	Decreto 838 de 2005.	“Establece las leyes 142 de 1994, 632 del 2000, y 689 del 2001, para rendir servicios de saneamiento público, y el Decreto 2811 de 1974 y Ley 99 de 1993 para Disposición Total de los Residuos Sólidos. E incluye las definiciones de disposición de residuos, las provisiones generales, y los sistemas para la utilización y disposición final, dentro de otras cosas”.
	Decreto 2755 (30 de septiembre del 2003).	“Describe las normas para la aplicación del anterior incentivo. Este incentivo es válido solamente si el desarrollador del proyecto puede obtener Reducciones Certificadas de Emisiones (RCE's) bajo

	el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) e invierta por lo menos 50 por ciento de las ganancias obtenidas por la venta de RCE's en obras de beneficio social en la región donde el generador está localizado".
Decreto 2981 de 2013	Define el servicio público de aseo como" el servicio de recolección municipal de residuos Principalmente sólidos. También se aplicara esta ley a las actividades complementarias de transporte, aprovechamiento y disposición final de tales residuos.
Resolución 0330 de 2017	Reglamenta los requisitos técnicos que se deben cumplir en las etapas de diseño, construcción, puesta en marcha y operación, mantenimiento, y rehabilitación de la infraestructura relacionada con los servicios públicos de acueducto alcantarillado y aseo.

Fuente: Elaboración Propia, 2019.

## 2.4 DESCRIPCION DEL AREA DE ESTUDIO

El relleno sanitario el Buchelli como se puede observar en la Figura 1 se encuentra ubicado en la zona rural del municipio de Tumaco Nariño, a la altura del Km 19 de la vía que comunica al municipio de Tumaco con la ciudad de Pasto. El municipio de Tumaco se localiza en la parte occidental del departamento de Nariño, a orillas del océano pacífico y a una distancia de 300 km de San Juan de Pasto, capital departamental [32].

Figura 1. Ubicación de la Zona de Estudio.



Fuente: Google Maps, 2019.

El relleno sanitario cuenta con las siguientes zonas como se describe a continuación:

- **Manejo residuos sólidos:** El manejo que se le da a los residuos sólidos dispuestos en el Relleno Sanitario Buchelli esta principalmente encaminado a prevenir afectaciones al medio ambiente para lo cual se adoptaron los siguientes procesos: Pesaje y Registro de los Residuos Sólidos, Descargue de Residuos.

(Descargue en plataforma, Disgregación de los residuos, Compactación de los Residuos), Coberturas Intermedias, Drenajes de lixiviados [33].

- **Tratamiento de Lixiviados:** inicia en cada una de las celdas, mediante su captación por drenaje; dicho caudal es llevado mediante tubería a la planta de tratamiento de lixiviados en donde mediante proceso físico químico, se depura la carga contaminante del mismo según el proceso operativo. El sistema de tratamiento entro en operación total en el mes de mayo de 2014, generando un caudal de vertimiento por bombeo de 2,6 L a la quebrada El Guayabo, el cual es medido diariamente mediante el método volumétrico [34].
- **Laguna de homogenización:** Los lixiviados provenientes del tanque de almacenamiento son dirigidos a la laguna de homogenización con capacidad máxima de almacenamiento de 170 m<sup>3</sup>, sin embargo como medida preventiva, es llenada hasta un máximo de 130 m<sup>3</sup>, los efluentes que ingresan a la laguna se someten a un tiempo de retención de 24 horas aproximadamente [35].
- **Tanques de oxidación:** Los efluentes provenientes de la laguna de estabilización, ingresan a los Reactores 1 y 2, tanques de oxidación con una capacidad de 20 m<sup>3</sup> cada uno, para recibir tratamiento químico mediante la adición de Peróxido de hidrógeno al 50% con el fin de oxidar la carga conteniente del afluente. [36].
- **Tanques de Floculación y sedimentación:** Posterior a la aplicación de Cloruro férrico y cuando el PH llegue a 6,5, se inicia el proceso de floculación y sedimentación en el Reactor número 4 con capacidad de 20 m<sup>3</sup> y un tiempo de retención hidráulico de 12 horas [37].
- **Lechos de secado:** Luego de la sedimentación, los lodos sedimentados son ingresados a los lechos de secado compuestos por filtro de arena y grava de 10", 4" y 1" con una capacidad total de 80 m<sup>3</sup>, estos lechos tienen un mantenimiento semanal, con retiro de lodos, los cuales son estabilizados con CAL HIDRATADA y llevados a las celdas de disposición [38].
- **Vertimiento:** Los efluentes clarificados provenientes del Reactor 4, son conducidos a una caja de inspección, en donde por medio de una electrobomba se conducen a su punto de descarga sobre la quebrada El Guayabo [39].

## CAPITULO III: METODOLOGÍA

En este capítulo se describe de forma detallada cada uno de los métodos que fueron utilizados en las tres fases I) caracterización del biogás que se genera en el relleno sanitario Buchelli. II) Análisis de los parámetros físico-químicos del suelo que garanticen una producción constante del biogás y III) Análisis técnico y financiero que soporte el diseño del sistema de aprovechamiento del gas y socialización con los funcionarios de la empresa aguas de Tumaco y la comunidad tumaqueña.

### **3.2 FASE I) CARACTERIZACIÓN DEL BIOGÁS QUE SE GENERA EN EL RELLENO SANITARIO BUCHELI Y CRUZAR ESTA INFORMACIÓN CON LOS DATOS HISTÓRICOS LO QUE PERMITIRÁ LA CUANTIFICACIÓN REAL DEL BIOGÁS.**

Con el fin de dar alcance al objetivo uno y el desarrollo de la fase 1 se desarrollaron las siguientes actividades en el siguiente orden:

1. Recopilación de información secundaria sobre caracterizaciones de biogás realizadas en el relleno sanitario en años anteriores.
2. Asignación de los puntos de muestreo para caracterizar los gases emitidos en la atmosfera durante el año 2018.
3. Producción y proyección de biogás.
4. La caracterización de los residuos sólidos.
5. El diseño del modelo del Biodigestor.

A continuación, se describe a mayor profundidad cada una de las actividades mencionadas:

**Actividad 1. Recopilación de información:** La adquisición de Información Secundaria se basó principalmente solicitarle a la empresa aguas de Tumaco información de las caracterizaciones realizadas del Biogás en años anteriores además de información básica del relleno y los diferentes planos y estudios de suelos realizados en el área de estudio.

**Actividad 2. Determinación de los puntos de muestreo de biogás:** Primero se seleccionaron 6 puntos (teas) de muestreo como se puede apreciar en la Tabla 2. Una vez seleccionado todos los puntos se procedió a purgar la línea de evacuación del gas en cada uno de ellos, la purga consistió en cerrar durante un 1 minuto la válvula de salida del gas, luego se procedió abrir progresivamente esta válvula para la salida del gas residual.

Tabla 2.Ubicación de los puntos seleccionados

Tea	Ubicación	
	Norte	Este
4	01° 41' 42.7"	78° 46' 7.5"
5	01° 41' 43.8"	78° 46' 12.5"
6	01° 41'42. 01"	78° 46'12.25"
8	01° 41'46. 92"	78° 46'13.35
9	01° 41'48.7"	78° 46' 12.1"
11	01° 41'49.6"	78° 46'13.2"

Fuente: Elaboración Propia, 2019

Es importante mencionar que para determinar los gases de cada una de las fuentes Fijas (Chimeneas) se utilizó un analizador con sensor electroquímico de marca Sewerin Multitec 540 de fabricación alemana como se puede observar en la Figura 2 [40]. Teniendo en cuenta que este equipo tiene la capacidad de medir en un rango de 0 a 100 % de metano a nivel de inmisión, concentraciones de otros gases como CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S. Es de recalcar que durante el monitoreo se contó con el acompañamiento de la empresa ANALQUIM LTDA quien es la encargada de certificar esta actividad y son quienes proporcionan la información en cuento a los datos de la caracterización. Con la información secundaria suministrada por la empresa se realizó mediante un perfil grafico una comparación de la caracterización de los gases realizada en el año 2018, 2014 y 2012 con el objetivo de identificar si la producción de estos gases ha aumentado o disminuido con el transcurso del tiempo [41].

Figura 2.Determinación de los gases de cada una de las fuentes Fijas



Fuente: Carol Gonzalez, 2018.

**Actividad 3. Producción y proyección de biogás:** Para esta actividad se requiere estadísticamente crear una línea de tiempo de vida útil del relleno sanitario y a su vez por cuánto tiempo se seguirán generando gases en el interior, para este estudio la línea de tiempo ira desde el año 2012 hasta el año 2022, la proyección se realizará mediante cálculos matemáticos apreciados en la siguiente ecuación 1

$$Q_{M=\sum_{i=1}^n 2kl_0 M_i(e^{-kt})} \quad \text{Ecuacion (1)}$$

Donde:

$\sum_{i=1}^n$  = suma desde el año de apertura + 1 ( $i = 1$ ) hasta el año de proyeccion ( $n$ ).

$$QM = \text{generacion maxima de biogas} \left( \frac{m^3}{\text{año}} \right).$$

$$K = \text{indice de generacion de metano} \left( \frac{1}{\text{año}} \right).$$

$$l_0 = \text{generacion potencial de metano} \left( \frac{m^3}{Mg} \right).$$

$M_i$  = masa de residuos solidos dispuestos en el año  $i$  (Mg).

$t_{i=}$  edad de los residuos dispuestos en el año  $i$  (años).

los valores de  $k$  y  $L_0$  varían de la precipitación anual.

El método utiliza una ecuación de degradación de primer orden, asume que el período es de un año desde la colocación de los residuos y el comienzo de la generación de biogás, que por cada unidad de residuos, después de un año la generación disminuye exponencialmente, mientras la fracción orgánica de los residuos es consumida. Para sitios donde se conocen los índices de disposición, año con año, el modelo estima la generación de biogás, en un año.

La ecuación anterior estima la generación de biogás, usando cantidades de residuos dispuestos, acumulados a través de un año. Las proyecciones para años múltiples, son desarrolladas variando la proyección anual, el año de generación máxima, normalmente ocurre en el de clausura o al siguiente (dependiendo del índice de disposición en los años finales) para nuestro caso el año de clausura es 2022.

Los valores de producción de gas son calculados basándose en la información previamente recolectada en el relleno sanitario,  $k$  y  $L_0$  varían dependiendo de la precipitación anual y podrán ser usados para proyecciones de generación. En teoría, el valor de la generación potencial de metano en los residuos ( $L_0$ ), solo depende del tipo de residuos. Conforme el contenido de celulosa en los residuos aumenta, el valor de  $L_0$  también.

**Actividad 4. Caracterización Física de los Residuos sólidos:** La metodología que se utilizó para conocer la cantidad y caracterización física de los residuos sólidos corresponde a la planteada por la resolución 0754 del 2014, las cuales establecen el método de cuarteo para residuos sólidos y la obtención de especímenes para los análisis en el laboratorio.

Como se puede observar en la figura 3, el procedimiento consistió en obtener de cada ruta seleccionada el descargue de las bolsas de polietileno contenedoras de los residuos sólidos generados en los diferentes municipios que disponen los residuos sólidos en el Relleno Sanitario de Buchelli. Luego con ayuda de una pala cargadora frontal se homogenizan los residuos y se divide en cuatro partes aproximadamente iguales A, B, C y D; y se eliminan las partes opuestas A y C o B y D los cuartos seleccionados se homogenizan nuevamente y se repite el cuarteo hasta dejar un mínimo de muestra no inferior a los 50kg. Posteriormente se procede a cuantificar los componentes ya clasificados, se pesan por separado en la balanza y se anota el resultado en la hoja de registro.

Figura 3. Caracterización de Residuos Sólidos.



Fuente: Carol Litsy Gonzalez, 2018.

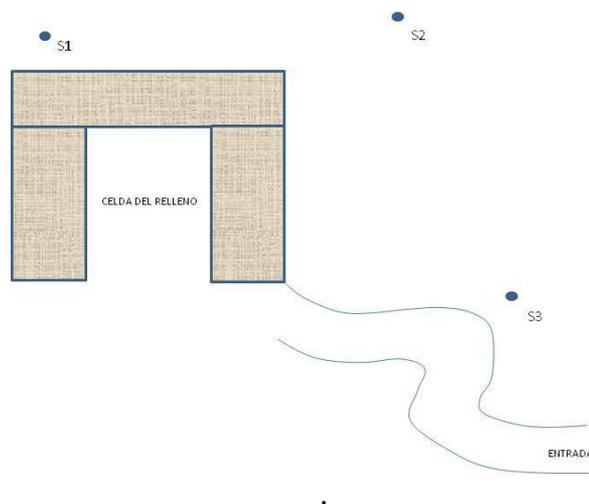
- **Actividad 5. Diseño del Biodigestor:** En cuanto a las dimensiones del Reactor (Biodigestor) se tuvo en cuenta las dimensiones aplicadas por Cedecap en su guía de diseño y manual sobre la instalación de un Biodigestor en donde especifica las medidas más adecuadas para su construcción a fin de garantizar su correcto funcionamiento con el objetivo de Prolongar su vida útil. Para el diseño del reactor se realizó 6 planos replanteo del terreno, excavación, Colocación de muros de ladrillos, Ubicación del Biodigestor, Conexiones [43].

### 3.3 FASE II) ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DEL SUELO QUE GARANTICEN UNA PRODUCCIÓN CONSTANTE DEL BIOGÁS

Con el fin de dar cumplimiento a la fase II se realizaron dos actividades, la primera consistió en la exploración del suelo y la segunda en la medición de los parámetros fisicoquímicos.

**Actividad 1. La exploración del suelo:** como se puede observar en la Figura 4, el proceso de exploración consistió en realizar en el sitio de interés Tres (3) sondeos cada uno a una profundidad de 6m, el primer sondeo se realizó junto a la vía de acceso, el segundo junto a la celda del relleno y el tercero hacia la parte más elevada del terreno con [44].

Figura 4. Localización de las Exploraciones



Fuente: Laboratorio de Control y Calidad Echeverry

el método de perforación empleado para la perforación del suelo consistió en realizar un barreno manual que es un método tradicional es considerado el más rudimentario de perforación, debido a que la herramienta utilizada se introduce en el terreno por presión y su avance se hace por rotación hasta que iguala su longitud, posteriormente se extrae y se retira el material que queda pegado en el instrumento ; de éste material se pueden obtener muestras alteradas de suelo que servirán para la identificación de las diferentes propiedades básicas del mismo ver Figura 5.

Figura 5. Perforación del suelo



Fuente: Carol Litsy Gonzalez, 2019.

**Actividad 2. Parámetros físico químicos del suelo :** Una vez finalizado el proceso de exploración del suelo se procede a tomar las muestras en cada uno de los puntos seleccionados, las cuales fueron recolectadas mediante tubos de pared delgada tipo Shelby y cuchara partida (Split Spoon) y fueron transportadas a los laboratorios de calidad. Ante la necesidad de establecer las características de los materiales que se encuentran en el suelo , como es los índices del suelo (Clasificación visual y al tacto, contenido de humedad, distribución granulométrica, límites de consistencia, peso volumétrico natural y densidad de sólidos), propiedades de resistencia (Compresión confinada, compresión simple y corte directo CD) y de deformación (Consolidación unidimensional) además de los parámetros químicos pH, Nitrógeno, conductividad y Materia Orgánica, así como para las concentraciones de las especies mayoritarias  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ , Fosforo, Hierro y Zinc [45].

### **3.4 FASE III) ANÁLISIS TÉCNICO Y FINANCIERO SOBRE EL DISEÑO DEL SISTEMA DE APROVECHAMIENTO DEL GAS CON EL FIN DE SOCIALIZARLES TODOS LOS RESULTADOS OBTENIDOS DEL PROYECTO A LOS FUNCIONARIOS DE LA EMPRESA AGUAS DE TUMACO Y LA COMUNIDAD TUMAQUEÑA.**

Para realizar el análisis técnico y financiero del diseño del sistema para el aprovechamiento del Biogás se realizó el cálculo de los costos directos e indirectos de la inversión, los costos directos consistieron básicamente en la mano de obra y los materiales, el costo asociado a la mano de obra se generó debido al tiempo empleado para la adecuación del terreno, la excavación de la fosa y el montaje como tal del biodigestor, en cuanto a los costos indirectos, fueron aquellos costos que complementan la acción para el montaje de los biodigestor, pueden estar representados por: puntillas, serrucho, pegante para PVC, entre otros, Otro valor asociado a estos costos lo representa el valor de la asesoría por un experto en el tema, en cuanto al montaje y puesta en marcha del mismo. Es importante mencionar que para realizar el estudio económico del proyecto, fue necesario soportarlo en un análisis del retorno de la inversión, basado en elementos tales como: Cálculo de la tasa interna de retorno (TIR), relación costo beneficio, cambios de flujo de caja, la incidencia de los efectos inflacionarios para la comparación de cifras y las proyecciones en el incremento de la venta del biogás.

Una vez finalizado el análisis técnico y financiero se realizó la socialización de los resultados obtenidos del proyecto a la comunidad en general y a los funcionarios de la empresa, es importante mencionar que la socialización para la comunidad se realizó desde la explicación de conceptos básicos como que son los residuos sólidos, procesos de degradación, relleno sanitario, biogás, y cambio climático , una vez realizado este procedimiento se inició abarcando la problemática que se presenta en el relleno producto del gas que se genera por la descomposición de los residuos sólidos ,mencionando también sus efectos en el ambiente y en la sociedad. Todo con el fin de involucrarlos en el tema y que identificaran la cantidad de gas que se generaría en el relleno durante su vida útil para que sintieran parte de la alternativa que se proponía como solución la cual con el transcurso del tiempo los beneficiaría generándoles una mejor calidad de vida porque contribuiría a generar una nueva fuente de combustible domestica como es el gas natural o domiciliario.

En cuanto a la socialización con los funcionarios de la empresa la socialización consistió en mencionarles de una forma muy efímera la problemática que se generaba como consecuencia del biogás , a ellos se les menciono su composición y se les justifico el porqué de su aprovechamiento y los beneficios que se generarían, adjunto a esto se mencionó el instrumento que se deseaba diseñar para dicha acción, contemplado diversos factores como es los costó de su implementación el tiempo de vida útil y la cantidad de materia orgánica disponible para su funcionamiento analizando un valor de costo-beneficio e inversión. Además de ello se les menciono la importancia de utilizar mecanismos de producción más limpia.

## CAPITULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 CARACTERIZACIÓN DEL BIOGÁS QUE SE GENERA EN EL RELLENO SANITARIO BUCHELI Y CRUZAR ESTA INFORMACIÓN CON LOS DATOS HISTÓRICOS LO QUE PERMITIRÁ LA CUANTIFICACIÓN REAL DEL BIOGÁS.

A continuación se muestra los resultados obtenidos en cada una de las actividades que se realizaron en esta fase, los resultados se mostraran en el siguiente orden primero la recopilación de la información secundaria sobre caracterizaciones de biogás realizadas en el relleno sanitario en años anteriores. Segunda actividad asignación de los puntos de muestreo para caracterizar los gases emitidos en la atmosfera durante el año 2018, en la tercera la producción y proyección de biogás, la cuarta la caracterización de los residuos sólidos y la quinta el diseño el modelo del Biodigestor como se describe a continuación.

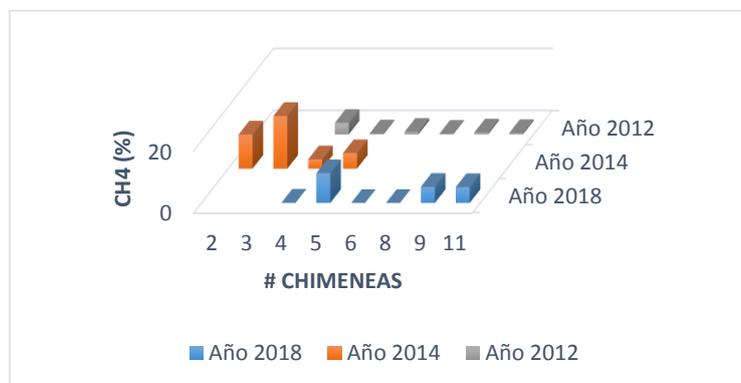
#### Actividad 1. Recopilación de la información secundaria sobre caracterizaciones de biogás realizadas en el relleno sanitario en años anteriores:

Las caracterizaciones que se han realizado en el relleno sanitario buchelli corresponden a los años 2012, 2014 y 2018 para cada uno de ellas se realizó un perfil grafico de cada uno de los gases CH<sub>4</sub> , CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> como se muestra a continuación:

#### ✓ Metano:

Como se puede apreciar en la Figura 6, en el año 2012 se registraron en cada una de las chimeneas monitoreadas los niveles más bajos de Metano (CH<sub>4</sub>) en rangos entre 3.7%-0.4%, las disminución de estos valores puede estar asociada a que en las primeras etapas de vida del relleno sanitario la producción de biogás puede ser mínima durante varios meses debido a los pocos niveles de materia orgánica [19].

Figura 6.Comparación de Niveles de CH<sub>4</sub> a través de los años.



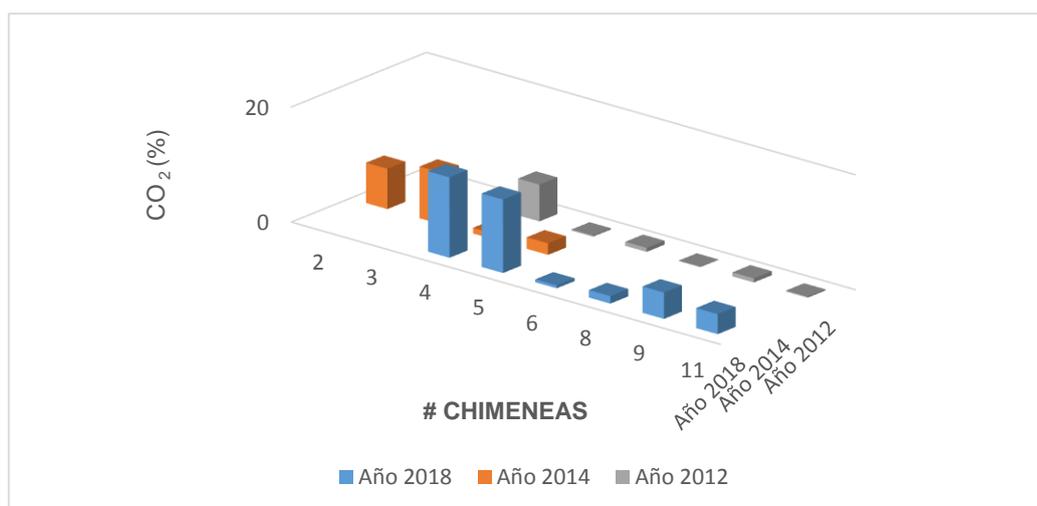
Fuente: Analquim Ltda, 2019.

A medida que el tiempo ha transcurrido los niveles de este metano han ido aumentando significativamente los valores más altos de CH<sub>4</sub> se registraron en el año 2014 en la chimenea N° 3 con concentraciones del 17%, el aumento de estos valores puede estar asociados a que en su etapa de operación en el relleno sanitario se genera una mayor degradación de la materia orgánica. Es importante resaltar que los niveles altos de CH<sub>4</sub> pueden ocasionar incendios y explosiones además que pueden contribuir al cambio climático, al calentamiento global y al aumento del ozono troposférico [21].

### ✓ Dióxido de Carbono

Con el transcurso del tiempo los valores de Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) han ido variando significativamente, los valores de CO<sub>2</sub> han ido incrementando sucesivamente desde el año 2012 hasta el año 2018, los valores más altos de este gas se registran el año 2018 con concentraciones máximas entre el 14% - 12.8% correspondiente a las tea No. 4 y 5 como se puede Observar en la Figura 7.

Figura 7. Comparación de Niveles CO<sub>2</sub> de a través de los años.



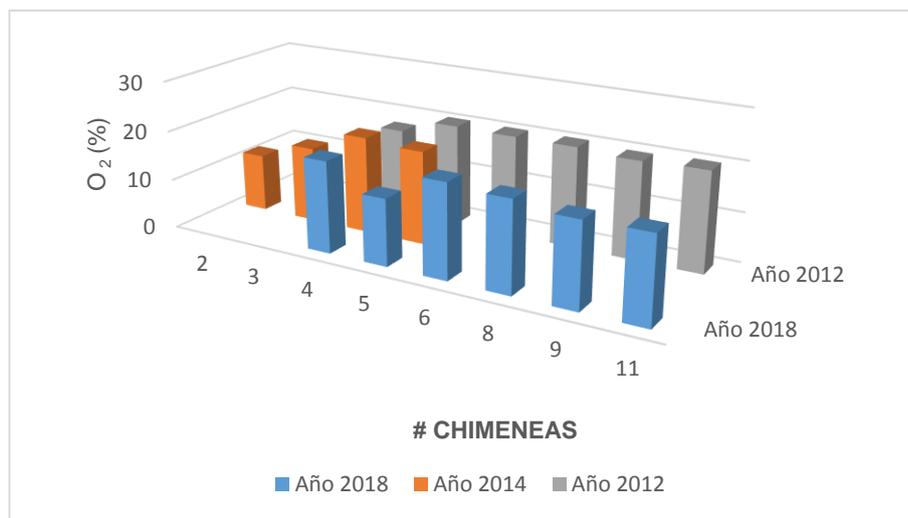
Fuente: Analquim Ltda, 2018.

Los valores altos de CO<sub>2</sub> son ocasionados por dos procesos la quema o incineración del metano y la descomposición de las grandes cantidades de materia orgánica existente en el relleno, es importante mencionar que el Bióxido de carbono permanece más de 120 años en la atmosfera a excepción del metano que tiene una vida media de doce años [33 y 34].

## ✓ Oxígeno

Los gases emitidos por las teas monitoreadas poseen un porcentaje alto de oxígeno (O<sub>2</sub>) durante los tres años los valores registrados se encuentran entre 20.5% y 19.5%, aunque existen variaciones de O<sub>2</sub> con el pasar de los años estas no son significativas ver (Figura 8).

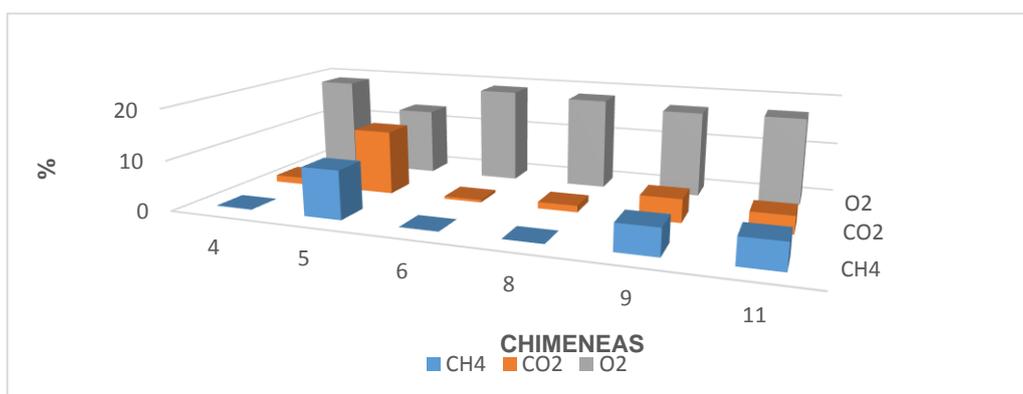
Figura 8. Comparación de Niveles O<sub>2</sub> de a través de los años.



Fuente: Analquim Ltda, 2019.

**Actividad 2. Caracterización del Biogás:** De acuerdo con los resultados obtenidos en la caracterización del biogás realizada en el año 2018 en el mes de octubre, como se puede observar en la Figura 9 la composición promedio de metano (CH<sub>4</sub>) en las Teas de estudio es 3,3%, la máxima concentración se registró en las Tea No. 5 con un valor de 9,6%.

Figura 9. Caracterización del biogás año 2018.



Fuente: Analquim Ltda, 2019.

Los gases emitidos por las teas monitoreadas poseen un porcentaje de oxígeno (O<sub>2</sub>) promedio de 17,3% y presentando un valor máximo de 19,0% en la tea No. 6. La composición promedio de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) emitido por las teas en el Relleno Sanitario Buchelli fue de 4,0%, la concentración máxima fue 12,8% de correspondiente a la tea No. 5. Como se muestra en la figura 9.

**Actividad 3. Producción y proyección de biogás:** En el transcurso de los últimos 10 años se han realizado estudios acerca del biogás proveniente del RS, donde se han establecido las características de composición y posibles cantidades de generación. La composición de los residuos es un aspecto clave para determinar la cantidad de metano que se generaría en un relleno sanitario teniendo en cuenta que el porcentaje de cada tipo de materia orgánica establece la velocidad de degradación que determina a su vez la tasa de generación de metano y la curva de generación del biogás en el transcurso del tiempo [41].

A continuación se presenta en la Tabla 3. la proyección de los residuos a recibir en el relleno sanitario Buchelli a partir de las toneladas que se generan actualmente y una tasa de crecimiento del 3%, conforme a las proyecciones de población del Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas - DANE y el bajo poder adquisitivo de la comunidad del municipio de Tumaco.

Tabla 3. Proyección de residuos

Año	Población	Ppc (Kg/hab-día)	Ton/día	Ton/año	Ton acumuladas
<b>2012</b>	126,350.00	0.63	80	24,835.36	24,835.36
<b>2013</b>	130,140.50	0.63	82	25,580.42	50,415.77
<b>2014</b>	134,044.72	0.63	84	26,347.83	76,763.60
<b>2015</b>	138,066.06	0.63	87	27,138.26	103,901.87
<b>2016</b>	142,208.04	0.63	90	27,952.41	131,854.28

Fuente: Relleno Buchelli, 2018.

Es por ello que la tasa de producción de metano puede ser estimada por diversos modelos de producción, para calcular el potencial de producción de biogás en el relleno sanitario Buchelli, como se puede apreciar en la tabla 4, se utiliza el modelo LandGEM debido que es una herramienta utilizada para estimar tasas de emisión de sitios de disposición de residuos sólidos urbanos basado en la ecuación de descomposición cinética de primera orden [8], para ello se utilizaron los siguientes datos:

- Cantidad promedio de RSU depositados, 24.441.625 Ton/año.
- Año apertura relleno 2010, año de clausura 2022.
- Precipitación promedio en la ciudad de Tumaco 935 mm/ año.
- Contenido de Metano 17%.
- $k = 0.065 \text{ año}^{-1}$ .
- $L_0 = 84 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{Ton}$ .

Tabla 4. Proyección de la generación de biogás

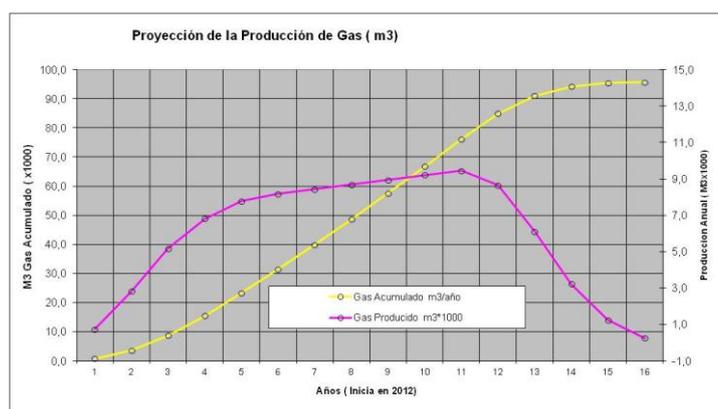
A fin de año	AÑOS											total	Gas prod. m <sup>3</sup> /año	Prod.acum m <sup>3</sup>
	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022			
	Toneladas Dispuestas por año (Ton/año)													
	24.960	25.709	26.480	27.274	28.093	28.935	29.804	30.698	31.619	32.567	33.544			
	Tasa de producción por gas m <sup>3</sup> /año													
0	0											0		
1	1498	0										1498	749	749
2	2621	1542	0									4.163	2.830	3579
3	1872	2699	1589	0								6.160	5.161	8.741
4	1123	1928	2780	1636	0							7.468	6.814	15.554
5	374	1157	1986	2864	1685	0						8.066	7.767	23.321
6	0	386	1192	2045	2950	1736	0					8.308	8.066	31.508
7		0	397	1227	2107	3038	1788	0				8.557	8.308	39.941
8			0	409	1254	2170	3129	1842	0			8.814	8.557	48.627
9				0	421	1302	2235	3223	1897	0		9.079	8.814	57.573
10					0	434	1341	2302	3320	1954	0	9.351	9.079	66.788
11						0	447	1381	2302	3419	2013	9.562	9.351	76.245
12							0	460	1423	2442	3419	7.745	9.562	84.896
13								0	474	1465	2516	4.455	7.745	90.999
14									0	488	1509	1.998	4.455	94.225
15										0	503	503	1.998	95.467
												503	503	95.727

16											0	0		
													0	

Fuente: Elaboración Propia, 2019.

Como se puede observar en la figura 10, los resultados obtenidos en la proyección de biogás son muy favorables teniendo en cuenta que la producción del gas aumenta a medida que va transcurriendo el tiempo, el valor pico se alcanza en el año 2022 que es la etapa de clausura, y es ahí cuando se alcanza la máxima capacidad de almacenamiento de residuos sólidos. La producción de biogás en las primeras etapas de vida de un relleno sanitario puede ser mínima durante varios meses lo que refleja los valores bajos obtenidos en el año 2012.

Figura 10. Proyección de la Generación de Biogás – Relleno Sanitario Buchelli



Fuente: Elaboración Propia, 2018.

Es importante mencionar que durante la vida útil del relleno sanitario la producción de gas se encuentra en valores de 25.000-2.022 m<sup>3</sup>/año y el incremento de estos valores puede ser ocasionado por los aumentos de la sobrepoblación lo que genera que exista un aumento en la producción de los residuos sólidos que en su mayoría son de tipo orgánico generando procesos Biológicos causantes de la digestión anaerobia causantes de este gas [39]. Sin embargo tras el cierre, un relleno sanitario continúa con la generación y emisión de biogás, posiblemente por varios años lo que refleja los resultados obtenidos en el año 2027.

**Actividad 4. Caracterización Física de los residuos sólidos:** De acuerdo con la información suministrada por la empresa que realiza la operación del relleno, la generación promedio de residuos sólidos para el municipio de Tumaco en el año 2016 y 2018 aumentó considerablemente debido al aumento de la población lo que contribuye a que haya un mayor consumo de productos como se puede apreciar en la tabla 11.

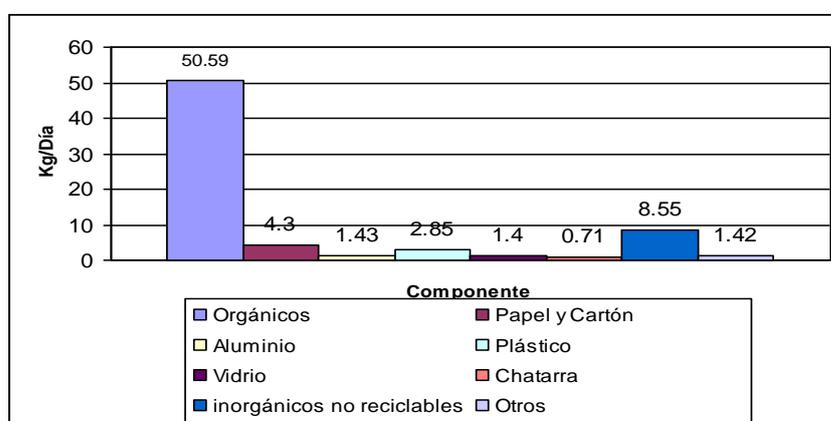
Tabla 5. Promedio de Residuos Sólidos.

Año	Cantidad de Residuos (Kg/año)
2016	24.441.625
2018	1.709.775,82

Fuente: Elaboración Propia, 2018.

Como se puede ver en la Figura 11. Los residuos del relleno sanitario son de dos tipos orgánicos e inorgánicos, los orgánicos se encuentran en un 81% de los cuales en su mayoría el 71% son pertenecientes a residuos de comida que son rápidamente biodegradables por ser residuos que pueden ser degradados Biológicamente [42], estos residuos son generados en los ámbitos comerciales (restaurantes, supermercados, residuos de producción de empresas, etc.). En segundo lugar se encontró como residuo depositado en el relleno papel y cartón, lo que indica que en la ciudad es muy bajo el porcentaje de habitantes que realiza separación en la fuente y que no se cuentan con planes serios de reciclaje que involucren directamente a la población generadora y al segmento de la población que de manera informal se dedica al aprovechamiento de este tipo de residuos.

Figura 11. Caracterización Física de los Residuos.



Fuente: Elaboración Propia, 2018.

**Actividad 5. Diseño del Biodigestor:** El diseño del Biodigestor tendría una vida útil de 5 años, a continuación se describe cada una de las actividades que se desarrollaron para su diseño y las dimensiones del Reactor:

**Construcción de la fosa:** La base para la construcción del biodigestores es la zanja o trinchera en donde se va a acomodar el biodigestor (polietileno tubular), en cada extremo de la fosa se construye una caja de ladrillo o cemento con un tubo de gres que es el que comunica la caja de entrada con el biodigestor, y en el otro extremo comunica al biodigestor con la caja de salida, que a su vez en estos tubos es donde se amarran los extremos del reactor.

**Preparación de la bolsa para el biodigestor.** Se requiere una bolsa (polietileno tubular) calibre 8 de 80 m de largo, que luego se reduce a la mitad al introducir una dentro de la otra para formar finalmente una capa de calibre 16. Primero es importante con un marcador realizar una línea guía a lo largo del plástico por el doblez por la parte interna, esta servirá como guía en el momento del amarre del plástico al tubo de gres en la fosa y para la instalación de la válvula de salida del biogás.

**Válvula de salida del biogás:** Luego se procede a instalar la válvula de salida del biogás en todo el centro de la estructura del biodigestor, sobre la línea guía

marcada anteriormente. Para esta operación una persona se introduce en el plástico con el adaptador macho y de adentro hacia afuera, se hace presión con el adaptador sobre la pared de la estructura.

**La válvula de seguridad:** se coloca cerca al biodigestor en la conducción que lleva el biogás hasta sitio de consumo, y su función es formar un sello de agua, que impide la salida del biogás en condiciones normales de operación, pero que lo deja escapar si en algún momento llega a haber exceso de presión evitando la ruptura del plástico.

**Instalación de la trampa de agua:** Esta trampa de agua se encuentra ubicada después de la válvula de seguridad. Para la construcción se toma una T” de PVC de 1 ½”, en la parte inferior se instala un tubo de PVC de 1 ½” con 20 cm de longitud, el cual debe tener un tapón en su extremo inferior de ajuste o roscada, de tal forma que cuando se vaya depositando agua en la trampa se quita el tapón y se deja drenar. Cabe resaltar que esta trampa se debe localizar en las partes más bajas de la conducción de biogás, en donde por gravedad se deposite el agua.

**las dimensiones del Reactor (Biodigestor):** se basan en las dimensiones aplicadas por Cedecap en su guía de diseño y manual sobre la instalación de un Biodigestor en donde especifica las medidas más adecuadas para su construcción a fin de garantizar su correcto funcionamiento, las medidas se establecieron según el autor de la siguiente Manera:

- Ancho de rollo y radio de la manga: El polietileno tubular se vende en rollos de 50 metros con un ancho de rollo que varía normalmente entre 1, 1.25, 1.50, 1.75 y 2 metros. Este ancho de rollo equivale a la mitad de la circunferencia total del plástico. Para la construcción de Biodigestores tubulares, es esa forma del plástico, la que permite hacer una cámara hermética si es que amarramos ambos extremos de la manga.

El ancho de rollo determina el diámetro y radio de nuestro Biodigestor para nuestro estudio utilizaremos el ancho de 1.75. Según los anchos de rollo más comunes en el mercado encontramos como se aprecia en la Tabla 6.

Tabla 6. Parámetros según el Ancho del Rollo

<b>Parámetros según el Ancho del Rollo</b>			
<b>Ancho del Rollo (m)</b>	Perímetro de la Circunferencia	Radio (m)	Diámetro (m)
1	2	0.32	0.64
1.25	2.5	0.40	0.80
1.50	3	0.48	0.96
<b>1.75</b>	<b>3.5</b>	<b>0.56</b>	<b>1.12</b>
2	4	0.64	1.28

Fuente: Elaboración Propia, 2018.

- Volumen de una manga, sección eficaz y longitud: El biodigestor es una manga de plástico amarrada por ambos extremos a una entrada y una salida. El volumen total de este manga equivale al volumen de un cilindro (en metros cúbicos) que se calcula multiplicando  $\pi \times r^2 \times L$ , siendo  $\pi=3.1416$ ,  $r$  el radio del tubo (en metros) y  $L$  la longitud del biodigestor (en metros). Lo normal es primero obtener los resultados de  $\pi \times r^2$  (sección eficaz) para cada uno de los anchos de rollos disponibles, para luego con estos valores, estimar la longitud necesaria para alcanzar el volumen total deseado, como nuestro ancho del rollo es 1.75 nuestra sección eficaz obtiene un valor de 0.97m esto se puede observar en la tabla 7.

Tabla 7. Sección Eficaz según el ancho del rollo

Sección Eficaz según el ancho del rollo	
Ancho del Rollo (m)	Sección Eficaz ( $\pi \times r^2$ ) m
1	0.32
1.25	0.50
1.50	0.72
<b>1.75</b>	<b>0.97</b>
2	1.27

Fuente: Elaboración Propia, 2018.

- Longitud del Biodigestor: Conociendo el volumen total que se desea tenga el biodigestor, y conociendo las secciones eficaces de los plásticos disponibles (según su ancho de rollo) es fácil determinar la longitud necesaria. Si el volumen del biodigestor es  $\pi \times r^2 \times L$ , y conocemos todos los parámetros excepto la longitud, despejando de la anterior fórmula se obtiene:  $L=Vt/(\pi \times r^2)$ . De esta manera se genera un cuadro en el que se ponen los resultados de la longitud para cada ancho de rollo, para nuestro caso la longitud del Biodigestor sería  $Vt/0.97$  ver (Tabla 8).

Tabla 8. Longitud del Biodigestor según el ancho del rollo

Longitud del Biodigestor según el ancho del rollo		
Ancho del Rollo (m)	Sección Eficaz ( $\pi \times r^2$ ) m	Longitud del Biodigestor
1	0.32	$Vt/0.32$
1.25	0.50	$Vt/0.5$
1.50	0.72	$Vt/0.72$
<b>1.75</b>	<b>0.97</b>	<b><math>Vt/0.97</math></b>
2	1.27	$Vt/1.27$

Fuente: Elaboración Propia, 2018.

- Relación óptima entre longitud y diámetro del biodigestor: Según lo anterior tendremos diferentes posibilidades de longitudes y anchos de rollo para alcanzar el volumen total deseado. Como se puede ver en la tabla 9, los anchos de rollos más grandes exigirán menores longitudes para alcanzar el volumen deseado. No conviene ni biodigestores demasiado cortos ni largos, y para ello existe una relación óptima entre el diámetro y la longitud que es 7.

Tabla 9. Longitud del Biodigestor según el ancho del rollo

Longitud del Biodigestor según el ancho del rollo			
Ancho del Rollo (m)	Diámetro del Biodigestor	Longitud del Biodigestor	L/d (Óptimo de 7 en un rango de 5-10)
1	0.64	$\sqrt{t}/0.32$	L/d
1.25	0.80	$\sqrt{t}/0.5$	L/d
1.50	0.96	$\sqrt{t}/0.72$	L/d
<b>1.75</b>	<b>1.12</b>	<b><math>\sqrt{t}/0.97</math></b>	<b>L/d</b>
2	1.28	$\sqrt{t}/1.27$	L/d

Fuente: Elaboración Propia, 2018.

- Dimensiones de la zanja del Biodigestor: El diseño final del Biodigestor pasa por conocer las dimensiones de la zanja donde se va a acomodar al plástico tubular. La longitud de la zanja se puede mirar en la tabla 10 donde queda determinada la longitud del Biodigestor, la profundidad y ancho de la misma la cual dependerá del ancho de rollo empleado en la construcción del Biodigestor.

Tabla 10. Dimensiones de la zanja del Biodigestor

Dimensiones de la zanja del Biodigestor					
AR	2	<b>1.75</b>	1.5	1.25	1
<b>a (m)</b>	0.7	<b>0.6</b>	0.5	0.4	0.3
<b>b (m)</b>	0.9	<b>0.8</b>	0.7	0.6	0.5
<b>P(m)</b>	1	<b>0.9</b>	0.8	0.7	0.6

Fuente: Elaboración Propia, 2018.

En la tabla 11 realizada solo uno de los dimensionamientos cumple una relación entre longitud y diámetro del biodigestor comprendía entre 5 y 10, que es para el caso de un ancho de rollo de 1.75m. Además en este caso la relación es óptima, ya que es muy cercana a 7. Conociendo, por tanto, el ancho de rollo que se va a emplear, y la longitud requerida de biodigestor, ya se pueden conocer las dimensiones de zanja donde se pondrá el biodigestor. Estas serán:

Tabla 11. Dimensiones de la zanja del Biodiverso

Ancho del Rollo 1.75m			
A	B	P	L
<b>0.60 m</b>	0.80 m	0.90 m	8 m

Fuente: Elaboración Propia, 2018.

Los planos del diseño del Biodigestor, son los siguientes el de replanteo del terreno (Ver. Anexo 4), excavación (Ver. Anexo 6), Colocación de muros de ladrillos (ver. Anexo 7), Ubicación del Biodigestor (ver. Anexo 8), y el de las conexiones (ver. Anexo 9), en cada uno de ellos se puede identificar las dimensiones que deberían ejecutarse en caso de que la empresa desee realizar su construcción con el fin de recuperar el biogás. Es de resaltar que el diseño y la implementación de este reactor en la empresa aguas de Tumaco para el aprovechamiento del combustible tendría una inversión de \$ 18.885.938 millones de pesos en caso de que la empresa desee ejecutar el modelo, en el anexo 10

se describe de forma detalla cada uno de los materiales que se necesitan para el montaje del rector y su respectivo valor unitario [45].

## 4.2 ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DEL SUELO QUE GARANTICEN UNA PRODUCCIÓN CONSTANTE DEL BIOGÁS.

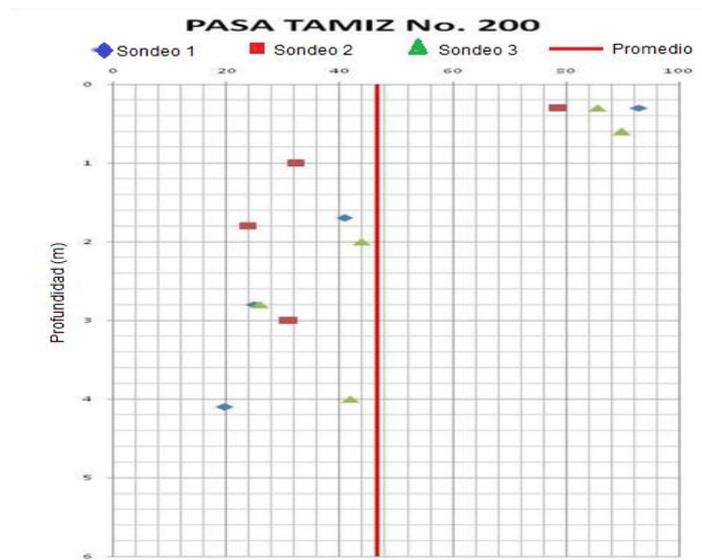
El biogás se genera como resultado de reacciones físicas, químicas y microbianas que ocurren dentro de los rellenos sanitarios, debido a la naturaleza orgánica de gran parte de los residuos, el proceso microbiano gobierna la producción de biogás. Estos procesos son sensibles al medio en que se desarrollan por lo que cualquier circunstancia que cambie el proceso a una condición aeróbica, influirá en la creación de biogás. Al revisar los resultados de la exploración realizada en el S1, S2 y S3 y de los ensayos de laboratorio ejecutados, se pueden establecer las siguientes características Fisicoquímicas de los materiales presentes en el área de estudio.

4.2.1 Características Físicas del suelo: en este análisis se tienen en cuenta el tamaño, Actividad, Consistencia y Clasificación del suelo:

### ✓ Tamaño

Como se puede observar en la figura 12, el promedio del porcentaje por tamizado No. 200 de las muestras evaluadas es de 46,6% con una desviación estándar del 27,6%; lo que muestra la gran variabilidad de tamaño de los materiales.

Figura 12. Variación del porcentaje pasa tamiz No. 200 con la profundidad



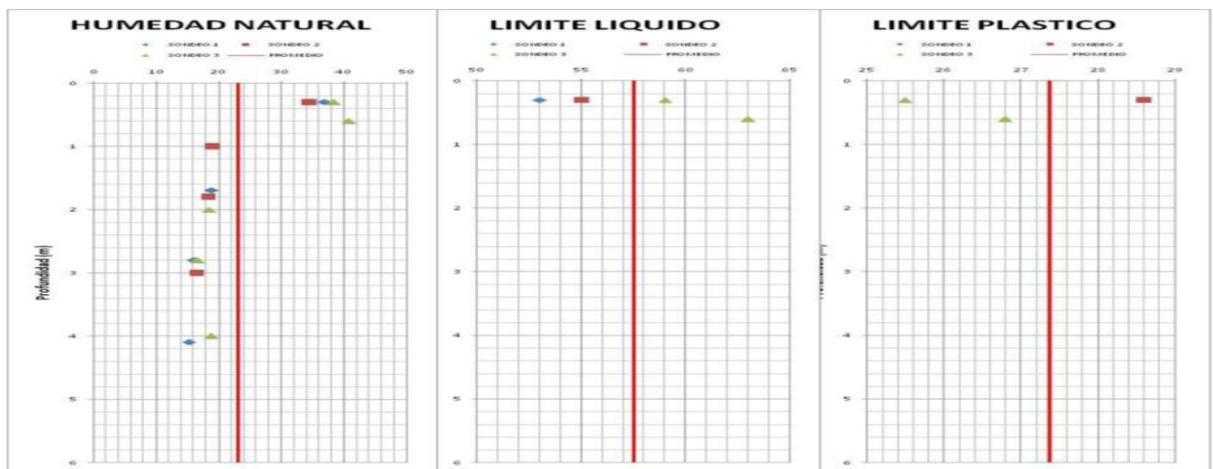
Fuente: Laboratorio Echeverry, 2019.

Según los resultados obtenidos en el gráfico los materiales presentes en la zona del suelo del relleno sanitario corresponden en primera instancia a suelos finos en la parte de la superficie apoyado sobre suelos granulares de origen aluvial con presencia de finos no plásticos, obviamente materiales con texturas finas permitirán relativamente bajas tasas de lixiviado o movimiento de gas [17].

✓ **Profundidad:**

Al analizar la variación de la humedad con la profundidad (Ver Figura 13) se observa que la mayoría de los materiales finos se comportan en el rango sólido, es decir que el comportamiento de las partículas no se ve afectado por los cambios químicos que se ocasionan.

Figura 13. Variación del porcentaje pasa tamiz No. 200 con la profundidad

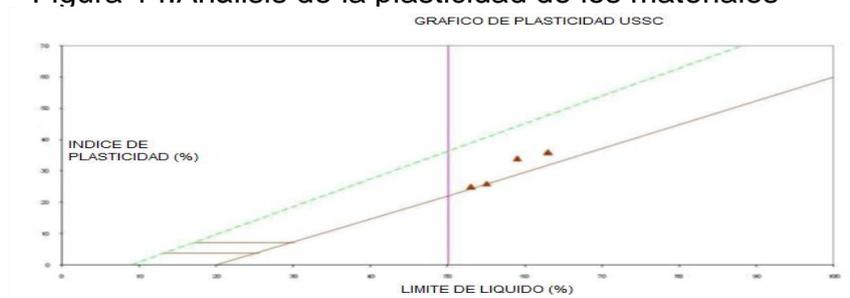


Fuente: Laboratorio Echeverry, 2019.

✓ **Compactación**

Al ubicar los resultados de los ensayos de los límites de Atterberg de la fracción fina en la carta de plasticidad (Ver Figura 14), se observa que el suelo se clasifica en su mayoría de materiales de alta plasticidad. En el caso de los materiales granulares presentes a partir de los 1,00 m de profundidad, presentan una humedad alta que reduce su compactación [23].

Figura 14. Análisis de la plasticidad de los materiales

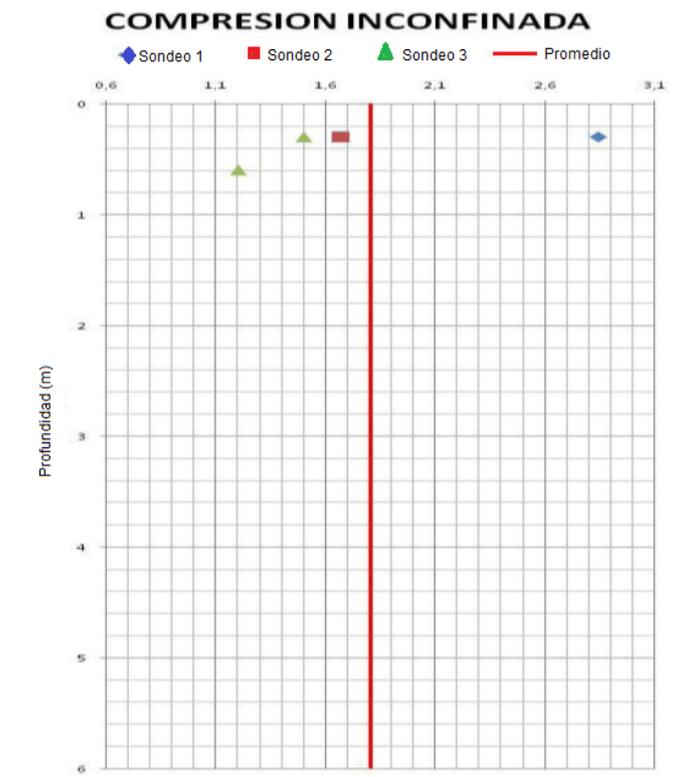


Fuente: Laboratorio Echeverry, 2019.

### ✓ **Compresión Confinada**

Al observar la variación de las pruebas de compresión inconfiada realizadas a las muestras inalteradas de los materiales finos (Ver Figura 15), se encuentra un promedio de 1,80 kg/cm<sup>2</sup> lo que ubica a los materiales con una consistencia firme, obteniéndose una desviación estándar de 0,72 kg/cm<sup>2</sup> [31].

Figura 15. Variación de la resistencia a la compresión inconfiada con la profundidad

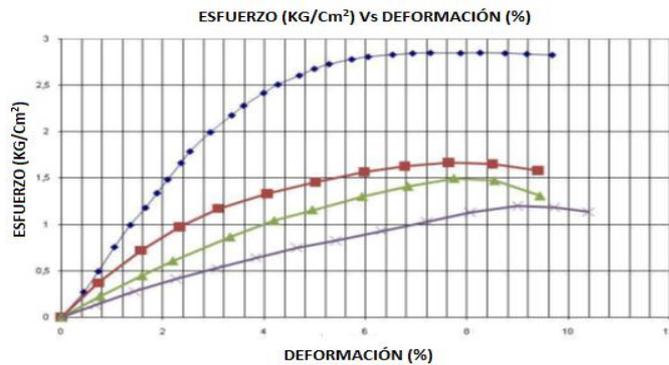


Fuente: Laboratorio Echeverry, 2019.

### ✓ **Deformación**

En cuanto al esfuerzo de deformación como se puede observar en la Figura 16, al analizar las gráficas se puede especificar que en la zona donde se efectuó el sondeo 1 se presenta una mayor resistencia superficial que en las zonas de los sondeos 2 y 3 que son zonas en las cuales se evidencia que la resistencia se disminuye por efectos de la contaminación a la que fue sometida la muestra durante el tiempo de exposición al contaminante [39].

Figura 16. Curvas de ensayo de resistencia a la compresión inconfiada



Fuente: Laboratorio Echeverry, 2019.

✓ **Resistencia al Corte**

Al realizar un análisis estadístico de detalle sobre la resistencia al corte no drenado de los materiales superficiales como se puede observar en la Figura 17, el promedio obtenido es de 0,90 kg/cm<sup>2</sup>, con una desviación estándar de 0,36 kg/cm<sup>2</sup>, lo que indica una variabilidad baja en el comportamiento de las arcillas superficiales [5].

Figura 17. Análisis estadístico de la resistencia al corte no drenado.



Fuente: Laboratorio Echeverry, 2019.

**4.2.2 Características Químicas del suelo:** En la tabla 12, se muestran los resultados generados para los parámetros químicos pH, Nitrógeno, conductividad y Materia Orgánica, así como para las concentraciones de las especies mayoritarias K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Fosforo, Hierro y Zinc, A continuación se describen cada uno de los parámetros:

Tabla 12. Parámetros químicos

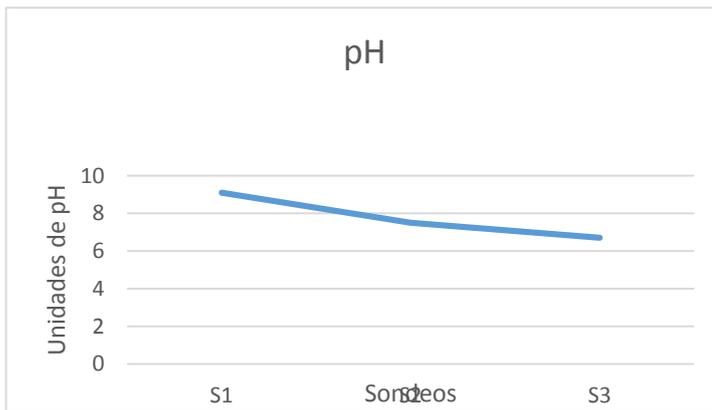
# registro	pH	%N	%MO	K (meq/100g Suelo)	Ca (meq/100g Suelo)	Mg (meq/100g Suelo)	P (ppm)	Fe (ppm)	Mn (ppm)	Znc (ppm)	Cu (ppm)
S <sub>1</sub>	9.1	0.24	5.5	1.67	15	6.5	4	158	93	11	9
S <sub>2</sub>	7.5	0.37	9.1	0.99	4.2	5.6	6	217	42	6	8
S <sub>3</sub>	6.7	0.28	6.6	2.11	8.6	6.7	4	123	104	7	5

Fuente: Laboratorio Echeverry, 2019.

### ✓ pH

De acuerdo con los resultados obtenidos para este parámetro como se puede observar en la figura 18, el pH más alto se identifica en S<sub>1</sub>, indicando su carácter básico; el S<sub>2</sub> posee un valor de pH neutro; y el S<sub>3</sub> posee valores que son considerados ligeramente ácidos.

Figura 18. Valores de pH



Fuente: Elaboración Propia, 2019.

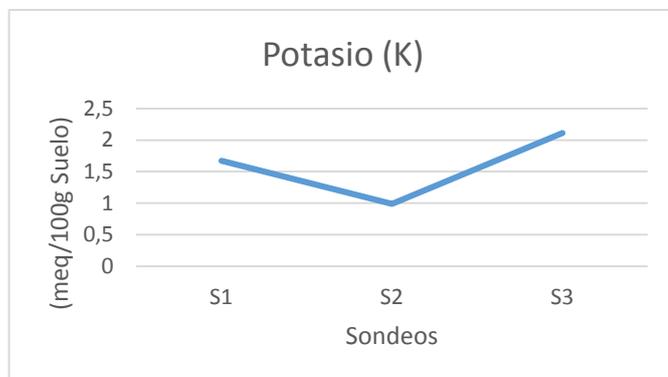
Sin embargo, el pH promedio obtenido entre los tres sondeos es de 7,7 el cual es característico de los lixiviados que se encuentran en la fase metanogénicas; es decir de lixiviados maduros o de clase III los cuales se caracterizan por realizar un proceso de tipo anaerobio con la producción de metano y con la simultanea generación de ácidos grasos tales como ácido propiónico, ácido valérico, entre otros.

### ✓ Potasio (K<sup>+</sup>)

Como se puede apreciar en la Figura 19, La distribución espacial de K<sup>+</sup> en la zona de estudio, varía en cada uno de los puntos, los valores de concentración de potasio aumentan en las zonas donde los lixiviados tienen más tiempo de haberse producido como es el caso de la muestra S<sub>3</sub>, cuya concentración de K<sup>+</sup> es mayor que la de S<sub>1</sub>, el aumento de estos valores podría deberse a la presencia

de importantes niveles de nutrientes, debido al evidente proceso de eutrofización de la laguna donde se captó esta muestra.

Figura 19. Valores de Potasio

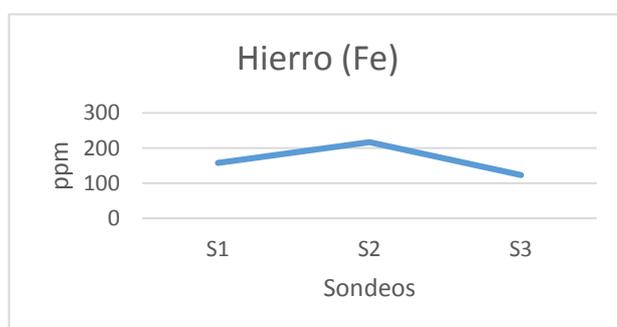


Fuente: Elaboración Propia, 2019.

#### ✓ Hierro (Fe)

Como se puede observar en la Figura 20, se identifica una variabilidad en la concentración del Fe en cada uno de los sondeos, que debe ser ocasionada probablemente como consecuencia de las variaciones en las condiciones redox, que se ocasionan en el relleno sanitario.

Figura 20. Valores de Hierro



Fuente: Elaboración Propia, 2019.

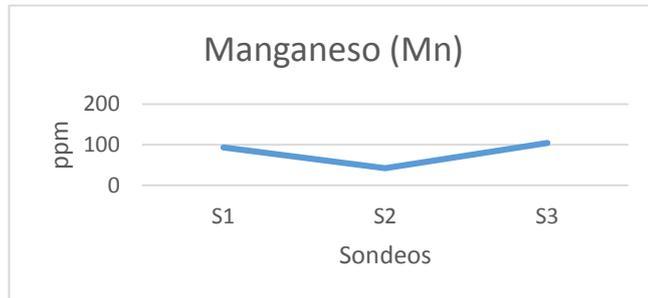
Es importante mencionar que la muestra del S<sub>2</sub>, que fue donde se encuentran los lixiviados estabilizados o de clase III se detectó una significativa proporción de Fe que la cual puede ser atribuida a la presencia de Fe (III), formado a pH neutros y alcalinos, en la forma geotita (FeOOH) o hematita (F<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) con un tamaño de grano coloidal.

#### ✓ Manganeso (Mn)

Por otra parte como se puede observar en la Figura 21, el Mn fue el siguiente elemento donde se evidenciaron las mayores concentraciones en comparación con el resto de los elementos. Se obtuvo un valor máximo de concentración de

104 ppm en la muestra S<sub>3</sub>; mientras que la mínima concentración de 42ppm se detectó en la muestra S<sub>2</sub>.

Figura 21. Valores de Manganeso



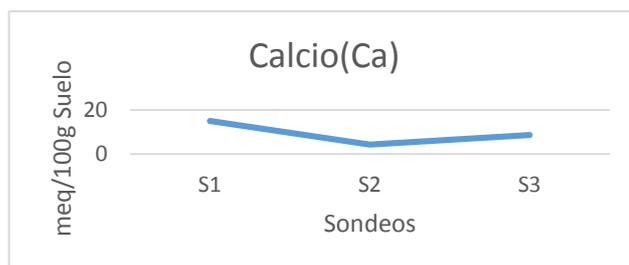
Fuente: Elaboración Propia, 2019.

Debe notarse que la concentración de Mn de manera similar al Fe, está influenciada por el pH, observándose que la concentración aumenta a medida que disminuye el pH (figura 18), esto debido a la solubilización del Mn durante la producción de ácidos orgánicos en la fase ácida en la que se realiza la descomposición química y biológica de la materia orgánica e inorgánica que se encuentra en los lixiviados del relleno sanitario,

#### ✓ Calcio (Ca<sup>2+</sup>)

La concentración de Ca<sup>2+</sup> en los lixiviados de la zona de estudio, presenta un valor promedio de 219 mg/L y un intervalo de concentración que está entre 15 y 534 mg/L, los valores de concentración más altos predominan en los lixiviados referidos a las muestras S<sub>2</sub> cuyos valores de pH son neutros, caso contrario sucede en los valores más bajos de concentración que hacen referencia a S<sub>1</sub>, donde el pH es alcalino como se puede apreciar en la figura 22.

Figura 22. Valores de Calcio.



Fuente: Elaboración Propia, 2019

#### 4.3 ANÁLISIS TÉCNICO Y FINANCIERO SOBRE EL DISEÑO DEL SISTEMA DE APROVECHAMIENTO DEL GAS CON EL FIN DE SOCIALIZARLES TODOS LOS RESULTADOS OBTENIDOS DEL PROYECTO A LOS FUNCIONARIOS DE LA EMPRESA AGUAS DE TUMACO Y LA COMUNIDAD TUMAQUEÑA.

Los resultados obtenidos en el análisis financiero lo conforman básicamente el costo de la mano de obra y los materiales. El costo asociado del análisis financiero corresponde a la mano de obra que se genera debido al tiempo empleado para la adecuación del terreno, la excavación de la fosa, montaje como tal del biodigestor y la captación forzada del gas.

**CAPTACION FORZADA DEL GAS:** En esta etapa se realizó en la parte superior de la celda una conexión entre cada una de las fuentes fijas (Chimeneas) con los materiales mencionados en tabla 13, el sistema consiste en realizar un circuito perimetral el cual evita la migración del biogás hacia afuera del relleno sanitario. Está conexión tiene un circuito interior, cuyo objetivo principal es capturar el biogás que se produce dentro del relleno y enviarlo a las unidades de combustión. Estos circuitos están diseñados para operar independientemente pero, ajustando las válvulas en la línea de conducción, los circuitos pueden ser conectados para trabajar como un solo sistema de extracción que conduzca el biogás hasta la TEA principal.

Tabla 13. Captación del Gas en la Celda

<b>MATERIALES PARA LA CAPTACION DEL GAS EN LA CELDA</b>				
<b>Detalle</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo</b>	<b>Total</b>
<b>Tuberia HDPA 6"</b>	u	19	\$110.789	\$2.104.991
<b>Yee 6"</b>	u	1	\$ 53.524	\$53.524
<b>Kalipega</b>	l	1	\$50.220	\$50.220
<b>Codo 6*45</b>	u	4	\$37.260	\$149.040
<b>Codo 6*90</b>	u	2	\$ 40.500	\$ 81.000
<b>Unión 6"</b>	u	5	\$ 4.212	\$21.060
<b>Tee PVC 6"</b>	u	19	\$23.976	\$455.544
<b>Llave de Tubo</b>	u	1	\$ 38.880	\$ 38.880
<b>Abrazadera 6"</b>	u	3	\$6.318	\$18.954
<b>Bomba de vacio</b>	u	1	\$8.000.000	\$8.000.000
<b>Teflón</b>	u	10	\$2.592	\$25.920
<b>Excavadora</b>	H	45	\$ 97.200	\$4.374.000
<b>Trabajador</b>	u	1	\$1.620.000	\$1.620.000
<b>Total</b>				<b>\$ 16.993.133</b>

Fuente: Elaboración Propia, 2019

Como se puede observar en la tabla 14, la empresa aguas de Tumaco ha decidido adicionarle al presupuesto obtenido de la captación del gas en la celda un incremento del 30%, este incremento obedecería en su momento a gastos indirectos o circunstanciales lo cuales podrían ser ocasionados por el aumento del dólar, el incremento a los servicios administrativos o de diseño o posibles

elementos estructurales que en su momento no fueron tenidos en cuenta para el proceso de captación.

Tabla 14. Incremento de la AIU

Captación en la celda	\$ 16.993.133
AIU	30%(\$ 5.097.939)
Total captación forzada del gas	\$ 22.091.072

Fuente: Elaboración Propia, 2019

Tabla 15. Extracción Forzada.

<b>Años proyectados</b>	<b>Biogás anual en m3* 1.23kg/1000</b>	<b>Toneladas anuales</b>
2019	60.000	73.80
2020	62.000	76.26
2021	64.000	78.72
2022	65.000	79.95
2023	60.000	73.80
2024	44.000	54.12
2025	27.000	33.21
2026	14.000	17.22

Fuente: Elaboración Propia, 2019

Según el ministerio de ambiente y desarrollo sostenible quemar 1kg de gas cuesta 23.77 euros, en pesos colombianos sería un valor aproximado de \$88.169. Razon por la cual, se establece una relación directamente proporcional entre la cantidad de gas proyectado durante un año y el costo del beneficio que se obtendría en caso tal de comercializarlo. Como se puede observar en la tabla 15, los ingresos anuales que se obtendrían durante la vida útil del relleno sanitario sería de \$42.945.353 millones de pesos resaltando que los ingresos más importantes se obtendrían durante los años 2019 hasta el 2022 que es

Tabla 16. Ganancias anuales de captación forzada

<b>Toneladas anuales *</b> <b>\$88.169</b>	<b>ingresos anuales en pesos</b>
73.80	6.506.872
76.26	6.723.767
78.72	6.940.663
79.95	7.049.111
73.80	6.506.872
54.12	4.771.706
33.21	2.928.092
17.22	1.518.270
<b>Total ganancias en 8 años</b>	<b>\$ 42.945.353</b>

Fuente: Elaboración Propia, 2019

Es importante mencionar que se requiere un operario para monitorear el cual tendrá un sueldo mínimo con todas las prestaciones sociales, en base al valor actual se incrementa el 5% sacando un promedio de acuerdo a los datos del ministerio de trabajo aproximadamente eso incrementa para los años proyectados como se puede observar en la tabla 17.

Tabla 17. Proyección salario operador por 8 años

<b>Años proyectados</b>	<b>SMMLV</b>	<b>Salario anual</b>
2019	1.336.917	16.043.004
2020	1.403.762	16.845.144
2021	1.473.950	17.687.400
2022	1.547.647	18.571.764
2023	1.625.029	19.500.348
2024	1.706.280	20.475.360
2025	1.791.594	21.499.128
2026	1.881.173	22.574.076
<b>Total</b>		<b>153.196.224</b>

Fuente: Elaboración Propia, 2019

El mantenimiento se realiza dos veces al mes con un valor de \$100.000 es decir que para un tiempo de 8 años se obtendría un monto de \$1600.000 como se puede observar en la tabla 18, es importante mencionar que el mantenimiento se realiza con el fin de establecer una frecuencia de revisión y/o validación de los equipos de control (válvulas de alivio, manómetros, entre otros) del Biodigestor.

Tabla 18. Costo mantenimiento semestral

<b>Años proyectados</b>	<b>Mantenimiento</b>
2019	200.000
2020	200.000
2021	200.000
2022	200.000
2023	200.000
2024	200.000
2025	200.000
2026	200.000
<b>Total</b>	<b>\$1.600.000</b>

Fuente: Elaboración Propia, 2019

Para determinar la utilidad es necesario conocer la amortización de 8 años para los cuales se ha proyectado Donde: se divide el costo por 8 años. Ver (Tabla 19)

Tabla 19. Amortización de la captación forzada

	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8
<b>Costo : 22.091.072</b>								
<b>Amortización</b>	2.761.384	2.761.384	2.761.384	2.761.384	2.761.384	2.761.384	2.761.384	2.761.384
<b>Operario</b>	16.043.004	16.845.144	17.687.400	18.571.764	19.500.348	20.475.360	21.499.128	22.574.076
<b>Mantenimiento</b>	200.000	200.000	200.000	200.000	200.000	200.000	200.000	200.000
<b>Gastos</b>	19.004.388	19.806.528	20.648.784	21.533.148	22.461.732	23.436.744	24.460.512	25.535.460

Fuente: Elaboración Propia, 2019

Tabla 20. Utilidad de la captación forzada

ingresos anuales en pesos	Gastos anuales en pesos	Ganancias
6.506.872	19.004.388	-12.497.516
6.723.767	19.806.528	-13.082.761
6.940.663	20.648.784	-13.708.121
7.049.111	21.533.148	-14.484.037
6.506.872	22.461.732	-15.954.860
4.771.706	23.436.744	-18.665.038
2.928.092	24.460.512	-21.532.420
1.518.270	25.535.460	-24.017.190

Fuente: Elaboración Propia, 2019

**GASTO DISEÑO BIODIGESTOR:** Bajo el modelo de producción de gas se determina la generación de metano en el biodigestor de acuerdo a su capacidad que es 9.75ton de residuos sólidos orgánicos, con la ecuación cinética de orden 1

$$L_0 = 168 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{ton}$$

$$K = 0.065$$

$$T = 0.25$$

$$\text{Densidad} = 1.23\text{kg}/\text{m}^3$$

Teniendo en cuenta que se demoran 3 meses en degradar los residuos orgánicos

$$L_f = X \cdot L_0 \cdot e^{-kt}$$

$$L_f = 9.75\text{ton} \cdot 168\text{m}^3\text{CH}_4/\text{ton} \cdot e^{0.065 \cdot 0.25} = 1611.5976\text{m}^3 \text{CH}_4$$

Bidigestion =  $6445.36\text{m}^3\text{CH}_4 * 1.23\text{kg}/\text{m}^3 * 1\text{ton}/1000\text{kg}$

Generación del biogás =  $7.92\text{ton CH}_4 * 88.169 = 698.298$  aproximadamente  
\$700.000 bono de carbono anual.

Como se puede observar en la tabla 21, el estudio arroja que no es factible la construcción del biodigestor ni la captación en el sitio. Debido a que los ingresos anuales son de 700.000 aproximadamente para el biodigestor lo cual no respalda la inversión de \$ 24.551.719

Tabla 21. Diseño del Biodigestor

Fuente: Elaboración Propia, 2019

Tabla 18. Utilidad de la captación forzada

<b>TOTAL DISEÑO</b>	<b>\$ 18.885.938</b>
+ AIU 30% :	\$5.665.781
<b>TOTAL DEL DISEÑO BIODIGESTOR</b>	<b>\$24.551.719.</b>

Fuente: Elaboración Propia, 2019

Debido a que los ingresos anuales son de \$700.000 aproximadamente para el biodigestor lo cual no respalda la inversión de 24.551.719 Teniendo como conclusión final que el análisis financiero nos arroja que el proyecto no es viable para esta zona ya que la cantidad de residuos orgánicos que ingresan al relleno no generan la suficiente cantidad de gas metano, las limitaciones que se encontraron es que la comunidad es muy pequeña además a eso al ser una zona costera la mitad de los residuos orgánicos son arrojados al mar y nunca llegan al relleno No es factible la construcción del biodigestor ya que la inversión realizada no se recuperaría en los años que aún tiene de vida útil el relleno sanitario buchelli.

Tabla 19. Presupuesto Biodigestor

MATERIALES				
Detalle	Unidad	Cantidad	Costo	Total
Geomembrana	u	1	\$2.075.220	\$ 2.075.220
Pegamento Tetrafurano	l	1	\$113.400	\$113.400
Tubo OVC 6"	u	10	\$92.016	\$920.160
Yee 6"	u	1	\$ 53.524	\$53.524
Kalipega	l	1	\$50.220	\$50.220
Pega Tubo	l	1	\$56.052	\$56.052
Manguera Flex 1"	m	100	\$1.782	\$178.200
Válvula ½ PVC bola	u	2	\$5.994	\$11.988
Abrazadera 1"	u	8	\$1.944	\$15.552
Abrazadera ¾ "	u	6	\$2.430	\$14.580
Neplo Flex 1"	u	6	\$1.425	\$ 8.553
Neplo Corrido HG ½"	u	1	\$2.106	\$2.106
Codo HG 1/2	u	2	\$1.458	\$ 2.916
Válvula 1" Bola	u	1	\$22.032	\$22.032
Abrazadera 1 ½"	u	4	\$5.022	\$20.088
Cinta Invernadero	u	1	\$27.864	\$27.864
Codo 6*45	u	4	\$37.260	\$149.040
Codo 6*90	u	2	\$ 40.500	\$ 81.000
Adaptador Flex Macho	u	6	\$ 2.430	\$14.580
Tubo Plastidor 1"*6	u	1	\$2.397	\$2.397
Tarraja Plástica	u	1	\$ 20.736	\$ 20.736
Unión 1"	u	12	\$ 4.212	\$50.544
Tee 1"	u	2	\$5.508	\$ 11.016
Tapón PVC 6" Macho	u	2	\$ 16.848	\$33.696
Tapón PVC 6" Hembra	u	4	\$ 17.496	\$69.984
Tee PVC 6"	u	1	\$23.976	\$23.976
Llave de Tubo	u	1	\$ 38.880	\$ 38.880
Tubo 4" PVC	u	1	\$ 23.328	\$ 23.328
Tapón PVC 4" Macho	u	4	\$4.050	\$ 16.200
Tapón PVC 4" Hembra	u	2	\$4.050	\$8100
Abrazadera 6"	u	3	\$6.318	\$18.954
Tapón 4" Macho	u	2	\$3.726	\$7.452
Teflón	u	10	\$2.592	\$25.920
Flexo metro	u	1	\$12.960	\$12.960
Ladrillos	u	600	\$ 1.134	\$680.400
Piedra y Arena	u	1	\$615.600	\$615.600
Cemento	u	30	\$25.758	\$772.740
Cubierta Biodigestor	m <sup>2</sup>	30	\$113.400	\$ 3.402.000
Excavadora	H	45	\$ 97.200	\$4.374.000
Trabajador	u	3	\$1.620.000	\$4.860.000
<b>TOTAL DISEÑO DEL BIODIGESTOR</b>				<b>\$ 18.885.938</b>

Fuente: Elaboración Propia, 2019

Es por esta razón que una vez finalizado el estudio financiero se procedió a realizar las siguientes actividades:

- Socialización a la comunidad
- Socialización a los Funcionarios de Tumaco

**Actividad 1.Socialización a la comunidad:** Como se puede observar en la Figura 23, la información que se les suministro a la comunidad se basó en explicarles que en el relleno sanitario Buchelli se realiza la disposición final de residuos sólidos domiciliarios, industriales y comerciales entre otros mediante su depósito definitivo en el suelo.

Figura 23. Esquema de Clasificación de Residuos Solidos



Fuente: Elaboración Propia, 2019

De esta forma el sitio de disposición final le da solución a las necesidades de evacuación de alrededor de 24.441.625 kilogramos anuales de residuos provenientes de 7 municipios entre los cuales se encuentra Tumaco, Lorente, Candelilla, Imbili, Tanga Real, Espriella, Palmeira y Pueblo Nuevo.

Sim embargo, se mencionó que en la actualidad estos sitios de disposición, son considerados como fuentes emisoras de contaminantes atmosféricos debido la degradación de los desechos orgánicos que se generan, teniendo como resultado de la descomposición la formación de gases como el metano ( $CH_4$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y trazas de compuestos orgánicos volátiles (COV); que son gases de efecto invernadero y son potencialmente perjudiciales para la calidad del aire y la salud humana (ver figura 24).

Figura 24.Socializacion del proyecto a la comunidad.





Fuente: Elaboración Propia, 2019.

Fue importante también resaltar que con el transcurso del tiempo la producción del metano en el relleno ha aumentado significativamente en rangos 9.5%-17% debido al incremento de la población lo que ha contribuido a que haya un mayor consumo de alimentos lo que ocasiono que exista un aumento en el porcentaje de los residuos alimenticios que son los que más aportan a la producción del gas. Razón por la cual se ha decidido aprovechar el biogás debido que es un factor importante para ayudar a conservar y reducir la demanda de recursos naturales, disminuir el consumo de energía, preservar los sitios de disposición final y reducir la contaminación ambiental.

**Actividad 2. Socialización a los Funcionarios de Tumaco:** se ha evidenciado que en la actualidad los rellenos son una fuente de energía cuyo potencial está siendo desperdiciado, puesto que estos pueden ser utilizados para generar energía, el aprovechamiento del Biogás se convierte en un proyecto MDL de importancia significativa para los rellenos sanitarios, debido a que ayuda a reducir las emisiones de GEI, según lo establecido en el protocolo de Kioto, además que trae otros beneficios como mejoras en la calidad del aire (reducción de los malos olores), estabilidad geotécnica de la masa de residuos, minimización del riesgo de incendios, uso del biogás como combustible, entre otros.

Como se puede apreciar en la Figura 25, con los resultados obtenidos en el proyecto se estima que durante el tiempo de vida útil que tiene el relleno la producción del gas será mayor a medida que transcurre los años y está proyectada en rangos de 24.000 m<sup>3</sup>/año-33.544 m<sup>3</sup>/año, razón por lo cual se ha decidido realizar el aprovechamiento mediante el uso de un Biodigestor, debido a que la energía producida a partir de la biomasa, genera muy poca contaminación y este método tiene la ventaja de que los costos de producción son bajos (\$ 18.885.938 millones) , y se pueden recuperar los costos invertidos en el relleno sanitario en pocos años.

Figura 1. Socialización a los Funcionarios de Tumaco.



Fuente: Elaboración Propia, 2019.

## **CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **5.1 CONCLUSIONES**

La caracterización permitió identificar que el Biogás que se genera en el relleno sanitario está conformado principalmente por metano, Dióxido de Carbono y Oxígeno y se puede decir que las concentraciones del CH<sub>4</sub> se encuentran en valores de 17% a excepción de los Niveles de CO<sub>2</sub> que se encuentran en rangos de 18.5%, valores que pueden variar debido a que el metano al ser incinerado da como resultado de su combustión el Dióxido de Carbono, estos valores han ido aumentando con el transcurso del tiempo los niveles más alto de estos gases se registran en el año 2018, es por eso que al realizar la proyección de generación del Biogás hasta el tiempo de vida útil del relleno se puede garantizar una producción de estos gases en valores de 24.000-33.544 m<sup>3</sup>/año, razón por la cual se decidió aprovechar estos gases mediante una propuesta para la implementación de un Biodigestor.

Se logró evidenciar cambios importantes en las propiedades físicas, químicas, estructurales y mecánicas de las muestras producidas por la presencia de lixiviados de residuos sólidos durante un periodo de tiempo prolongado dentro de la estructura de una de las muestras. En términos generales, el mayor efecto generado por la presencia de lixiviados en las propiedades del suelo, se presenta en las propiedades químicas del suelo. Dichos cambios afectaron notoriamente la estructura del material y por ende se ven afectadas las propiedades mecánicas y demás propiedades del suelo. En los análisis granulométricos se observa que la muestra contaminada presenta mayor porcentaje de materiales finos debido a que el lixiviado actúa defloculando más la muestra produciendo un efecto desagregador de las partículas, las cuales perderían estabilidad en presencia de agua, que posteriormente mostrará influencia en la resistencia al corte.

En la socialización que se realizó a la comunidad y a los funcionarios de la empresa aguas de Tumaco se mencionó la utilización de biogás como fuente de energía local que se presenta como una oportunidad de contribución adicional al desarrollo sustentable y como una fuente de generación de empleo, inversión extranjera y desarrollo local. La venta de energía puede generar ingresos adicionales para rentabilizar la operación de un relleno sanitario y la recolección de biogás más allá del mínimo que se colecta actualmente. La energía generada en base a biogás puede ser distribuida a localidades aledañas a precios subsidiados para compensarlas por los efectos ambientales que la localización de rellenos sanitarios les puede generar.

## **5.2 RECOMENDACIONES**

Se recomienda evaluar los beneficios económicos y ambientales que se obtendrían de la implementación y puesta en marcha de los biodigestores propuestos para el tratamiento de la materia orgánica generada, ya que la inversión inicial no recupera al cabo de los ocho meses de operación.

Se recomienda si se desea implementar la propuesta, evaluar técnica y económicamente la posibilidad de importar de los municipios residuos sólidos para aumentar la capacidad del digestor y por ende la generación de biogás.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Comisión nacional de energía y Gamma Ingenieros S.A, «Análisis estratégico de elementos de política para biogases combustibles en Chile,» 2010.
- [2] Comisión nacional de energía y GTZ, «Potencial de biogás, Identificación y clasificación de los distintos tipos de biomasa disponibles en Chile para la generación de biogás,» 2007.
- [3] IPCC, «Climate Change, The Physical Science Basis,» 2007.
- [4] Ministerio del Medio Ambiente, «Reporte del Estado del Medio Ambiente,» Santiago, 2013.
- [5] M. D. L. A. Cornejos Salas, Guía para el diseño de sistemas de recuperación de biogás en rellenos sanitarios, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Santiago: Universidad de Chile, 2009.
- [6] Ministerio del Ambiente Perú, Guía de diseño, construcción, operación, mantenimiento y cierre de relleno sanitario manual, Lima, 2008.
- [7] V. Rajaram, From Landfill Gas to Energy - Technologies and Challenges, New Delhi: CRC Press/ Balkema Taylor & Francis Group, 2011.
- [8] F. Kreith, Handbook of Solid Waste Management 2ª Edition, California: McGraw-Hill, 2002. [10] Sandra Mazo, SCS Engineers, Sistemas de Captura y Control del Biogás, 2010.
- [9] U.S. Environmental Protection Agency, International Best Practices Guide for Landfill Gas Energy Projects, 2012.
- [10] Conestoga-Rovers & Associates, Landfill Gas Management Facilities Design Guidelines, Richmond, British Columbia, 2010.
- [11] Conestoga Rovers & Associates, Manual para la preparación de proyectos de generación de energía a partir de gas de rellenos sanitarios en America Latina y el Caribe, 2004.
- [12] COSEMAR S.A, «Declaración de Impacto Ambiental proyecto relleno sanitario Copiapo,» 2005.
- [13] Eco Securities, «Declaración de Impacto Ambiental Mejora sistema de captura y combustión controlada de gases del antiguo vertedero y actual relleno sanitario El Panul,» 2007.
- [14] GHD, «Estudio de Impacto Ambiental Relleno Sanitario Los Ríos,» 2012.

[15] GesNat Consultores Ambientales, «Declaración de Impacto Ambiental proyecto relleno sanitario La Higuera,» 2008.

[16] IGS Chile Ltda, «Estudio de Impacto Ambiental relleno Sanitario El Molle,» 2005.

[17] Ilustre Municipalidad de Huara, «Declaración de Impacto Ambiental Relleno Sanitario manual en la Localidad de Huara,» 2002. [28] Ilustre Municipalidad de Mejillones, «Declaración de Impacto Ambiental relleno snaitario de Mejillones,» 2009.

[18] Ilustre Municipalidad de Pica, «Declaración de Impacto Ambiental Optimización y mejoramiento de operación del relleno sanitario de Pica,» 2012.

[19] Ilustre Municipalidad de Pozo Almonte, «Declaración de Impacto Ambiental Construcción relleno sanitario para la comuna de Pozo Almonte,» 2003.

[20] Ilustre Municipalidad de Tocopilla, «Declaración de Impacto Ambiental relleno sanitario Quebrada Ancha,» 2008. [32] Ilustre municipalidad de Arica, «Declaración de impacto ambiental relleno sanitario municipal Quebrada Encantada Alta,» 2009.

[21] Ingeniería y construcción Cardenal Caro Ltda, «Declaración de Impacto Ambiental relleno sanitario Las Quilas,» 2002.

[22] Kristmann Ingenieros, «Declaración de Impacto Ambiental proyecto relleno sanitario comuna de Caldera,» 2009.

[23] ProAmbiente Ingeniería y servicios, «Estudio de Impacto Ambiental proyecto relleno sanitario Los Angeles,» 2003.

[24] kfw Bankengruppe, «Estudio de Impacto Ambiental Relleno Sanitario Provincial de Osorno,» 2009.

[25] Ministerio de Energía, Estudio Propuesta de perfeccionamiento de entorno a proyectos de aprovechamiento energético de lodos y residuos sólidos urbanos, 2011.

[26] U.S. Army Corps of Engineers, Landfill gas collection and treatment systems, 2013.

[27] A. Hamid, R. Debra y N. Antti, «Comparison of first-order-decay modeled and actual field measured municipal solid waste landfill methane data,» International Journal of Integrated Waste Management, Science and Technology, 2013.

[28] U.S. Environmental Protection Agency, Landfill Methane Outreach Program, LFGcost-Web V3.0, Washington D.C, 2014.

[29] GreenLabUC, «Estudio de Prefactibilidad Técnica y Económica de Aprovechamiento Energéticos para Vertederos de la Zona Centro-Sur de Chile,» Santiago, 2014.

[30] J. M. Alex Stege, «Evaluación del Relleno Sanitario y Estudio de Prefactibilidad para la Recuperación y la utilización del biogás en el Relleno Sanitario El Navarro,» Virginia, 2008.

[31] Universidad de Concepción Unidad de Desarrollo Tecnológico, «Calefacción distrital con biomasa en Chile, Evaluación de prefactibilidad técnica, económica y social de proyectos piloto en Osorno,» Coronel, 2015.

[32] Green solutions, «Medición y Mitigación de la Huella de Carbono en la Comisión Nacional del Medio Ambiente,» Santiago, 2011.

[33] Eukrasia Technology & Environment, «Leachate Evaporator SWANA Western Symposium of Solid Waste Association of North America,» California, 2012.

[34] E. Giraldo, «Tratamiento de Lixiviados de Rellenos Sanitarios: Avances Recientes,» Revista de Ingeniería N° 14 Universidad de los Andes Colombia, 2002. [51] Ministerio Desarrollo Social, «Precios Sociales Vigentes 2015,» 2015.

[35] Comisión Nacional del Medio Ambiente, «Primer reporte del manejo de residuos sólidos en Chile,» 2010

ARAUZ, Jeremías; ULRICH, Pablo. Biodigestores. Río Negro, Argentina: Universidad de Río Negro. 2015

HERRERO, Jaime. Biodigestores familiares: Guía de diseño y manual de instalación de biodigestores de polietileno tubular de bajo costo para el trópico, valle y altiplano. La Paz, Bolivia: Cooperación Técnica Alemana – GTZ. 2010.

PAREDES Juan; RAMIREZ John. Energías renovables variables y su contribución a la seguridad energética: complementariedad en Colombia. Bogotá, Colombia: Banco Interamericano de Desarrollo BID. 2017.

JARAMILLO, Gladys; ZAPATA, Liliana. Aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos en Colombia. Medellín, Colombia: Universidad de Antioquia. 2008.

[27] L. William, Kineticsof anaerobic digestion. Journal Water Pollution Control, 2000.

- [28] L.J. Oscar, Computer and Experimental Simulations of the Production of Methane Gas from Municipal Solid Waste, *Water Science and Technology*, Vol. 27, 2001.
- [29] S. Luis, La Planta de Biogás. Eschbrom. 2003.
- [30] O. Gloria, Biorreactores Anaerobios, Cuernavaca, Mexico. 2001.
- [31] C. Miller, An Integrated Solid Waste Facility Design Involving Recycling, Volume Reduction, and Wetlands Leachate Treatment, Universidad de Florida, 2000.
- [32] D. Reinaldo, Análisis Útiles en Digestión Anaerobia. Seminario Internacional sobre Digestión Anaerobia. Universidad de los Andes. Bogotá, Colombia. 2000.
- [33] A. Nidia, Microbiological Processes in Landfills, *Water Science and Technology*. 2001.
- [34] OPS/BID, Organización Panamericana de la Salud- Banco Interamericano de Desarrollo. Diagnóstico de la Situación de Residuos Sólidos en América Latina y el Caribe, 1997
- [35] P. Sandra. Manejo y Disposición de Residuos Sólidos Urbanos. ACODAL, Bogotá. 2004.
- [36] F. Gabriel, Critical Review and Summary of Leachate and Gas Production from Landfills, EPA/600/ S2-86/073, U. S. EPA Hazardous Waste Engineering Research Laboratory, Cincinnati, OH, 2000.
- [37] P. Mark, From Municipal Solid Waste to Biomass Gasification ECOS 2003 16th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems. Copenhagen, Denmark. 2003.
- [38] Revista Residuos, año VII. No 38.2001.
- [39] SADAT INTERNATIONAL INC, Universidad de los Andes, Artur D Little Inc. Informe del Diagnóstico Geotécnico y Ambiental de las Causas del Deslizamiento en el Relleno Sanitario de Doña Juana. Santafé de Bogotá. 2005.
- [40] B. Ernesto, "Sanitary Landfill-Leaching Prevention and Control", *Journal Water Pollution Control Federation*, vol. 43, 2006.
- [41] SCS ENGINEERS, INC.: "Procedural Guidance Manual for Sanitary Landfills". Volume I. Landfill Leachate monitoring and Control Systems, California Waste Management Board, Sacramento, CA, 2001.

[42] SCS ENGINEERS, INC. Procedural Guidance Manual for Sanitary Landfills. Volume II. Landfill Leachate monitoring and Control Systems, California Waste Management Board, Sacramento, CA, 1989

[43] V. Samuel, Gestión Integral de Residuos Sólidos, Volumen I. Traducido por Tejero, J,; Gil, J, y Szanto, M: de la Primera Edición en Ingles: Integrated Solid Waste Management. 2003.

[44] T. Pedro, Hazardous Waste Regulations 2ns ed., Van Nostrand Reinhold, New York. 1991.

[45] L. Andrea, An Assessment of the Odor and Toxicity of the Trace Components of Landfill Gas, Silver Spring, MD. 2000.

[46] A. German, “Análisis de viabilidad para el aprovechamiento energético de vertederos controlados de residuos sólidos urbanos,” Tesis de Pregrado, Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia. p. 26, 2009.

[47] M. Milgen, Estimación de la generación de energía a partir de biomasa para proyectos del programa de mecanismo de desarrollo limpio, 2008.

[48] T. Brindley, «Landfill Gas, Industry Code of Practice, The Management of Landfill Gas,» 2012

## ANEXOS

### Anexo 1. Muestras de suelo para Análisis Físicoquímico.



Fuente: Elaboración Propia, 2018.

### Anexo 2. Caracterización de Residuos Sólidos.

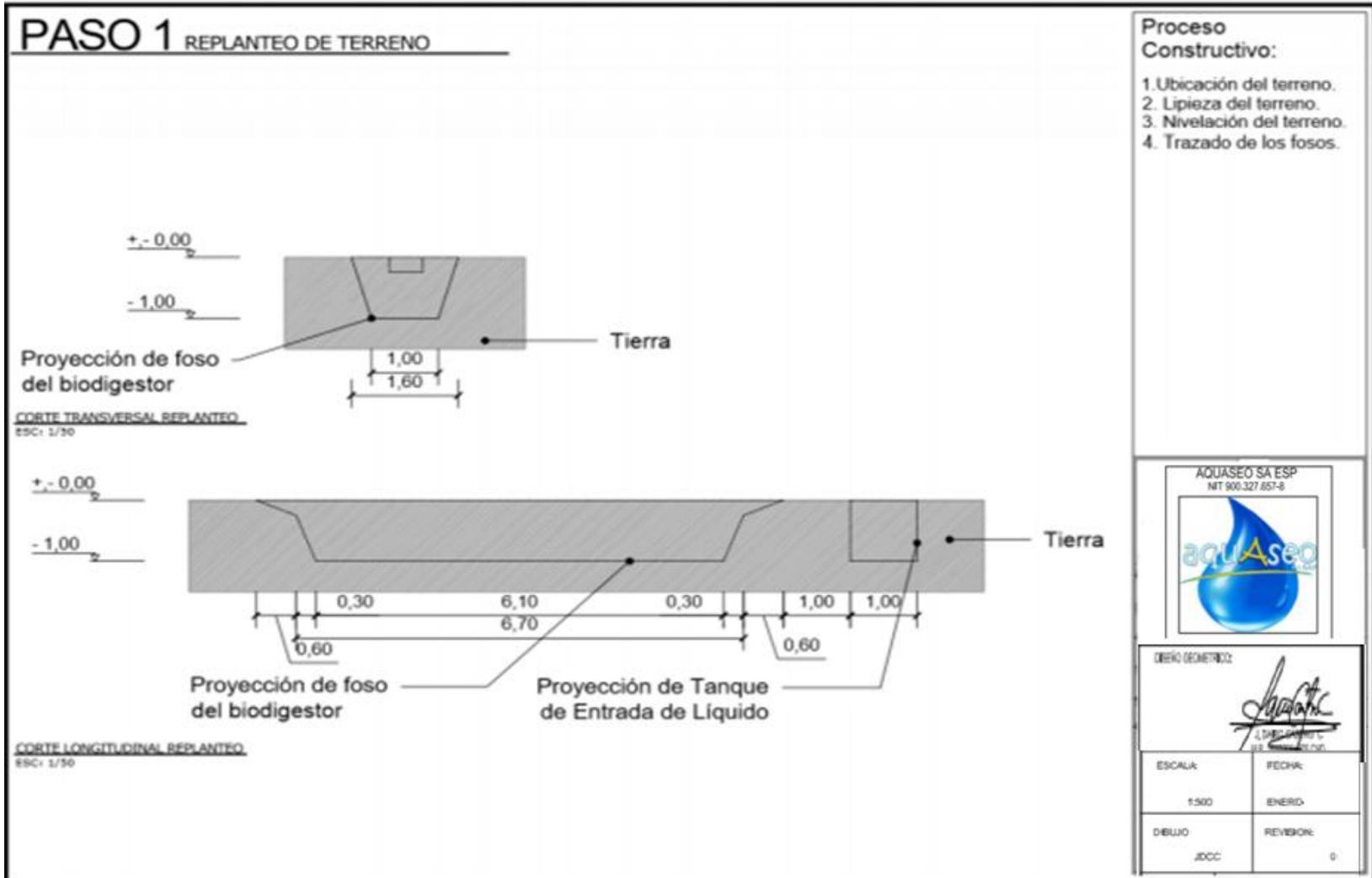


Fuente: Elaboración Propia, 2018.

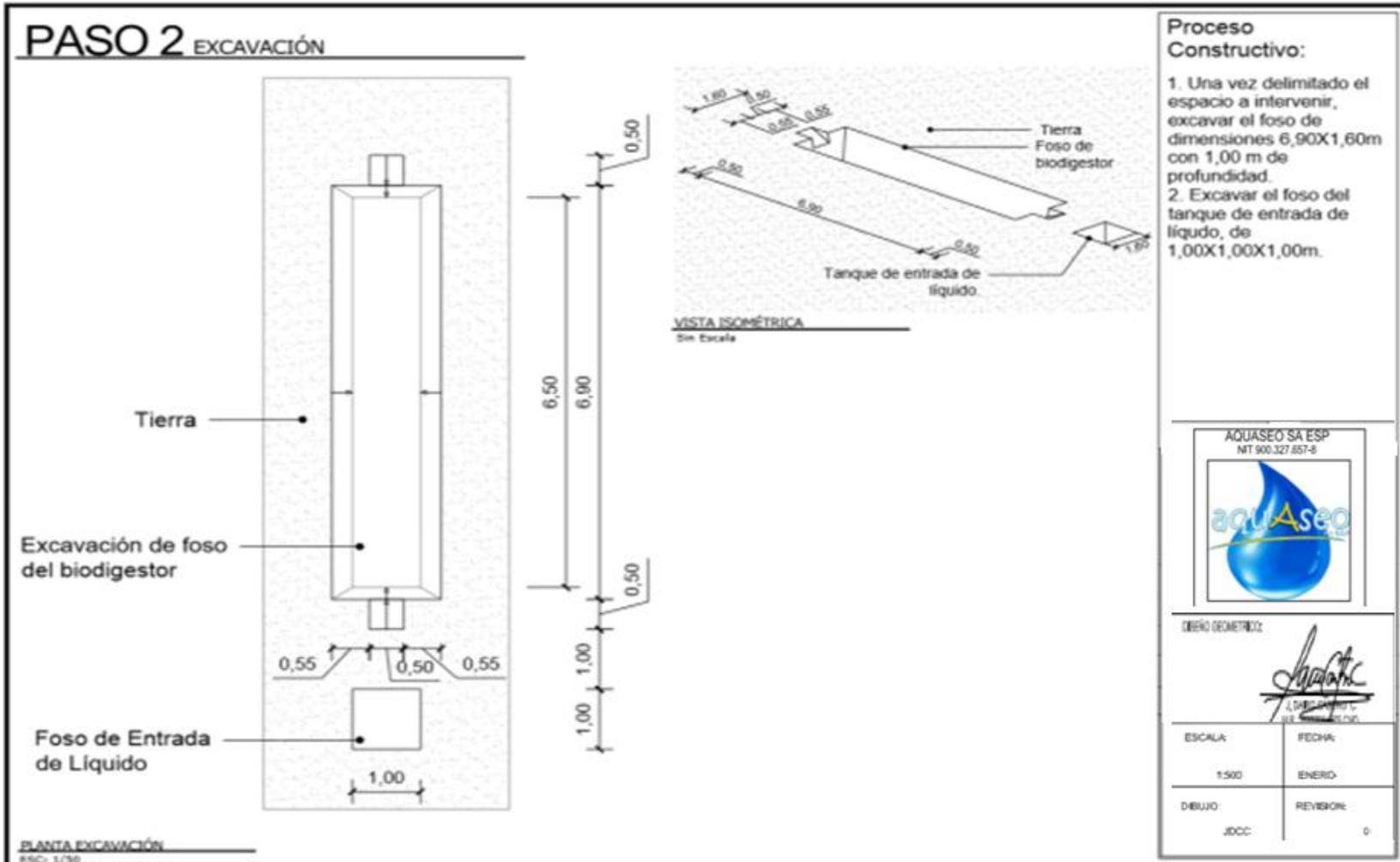
Anexo 3. Estaciones de Monitoreo para la Caracterización del Biogás.



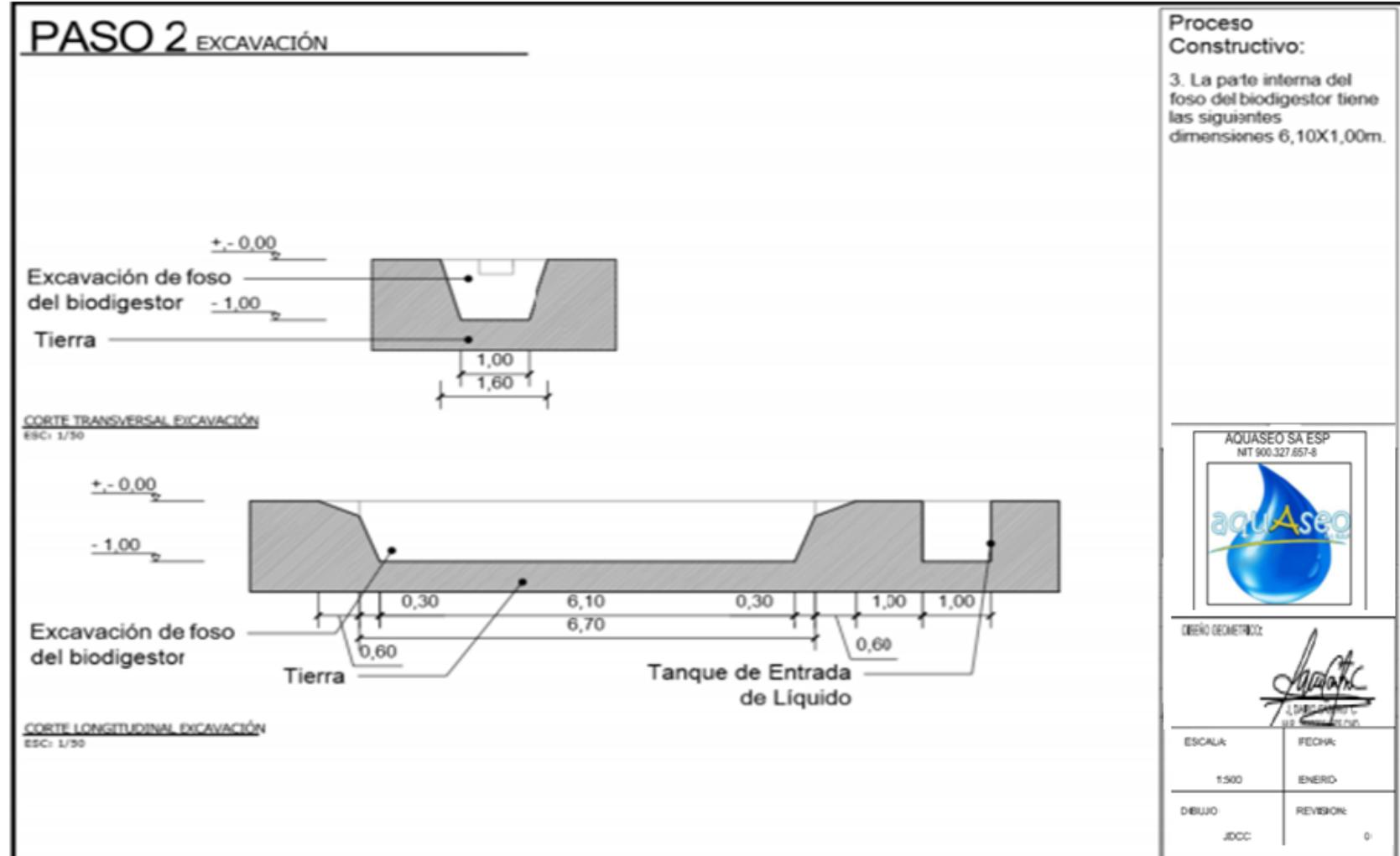
Anexo 4.Replanteo del Terreno.



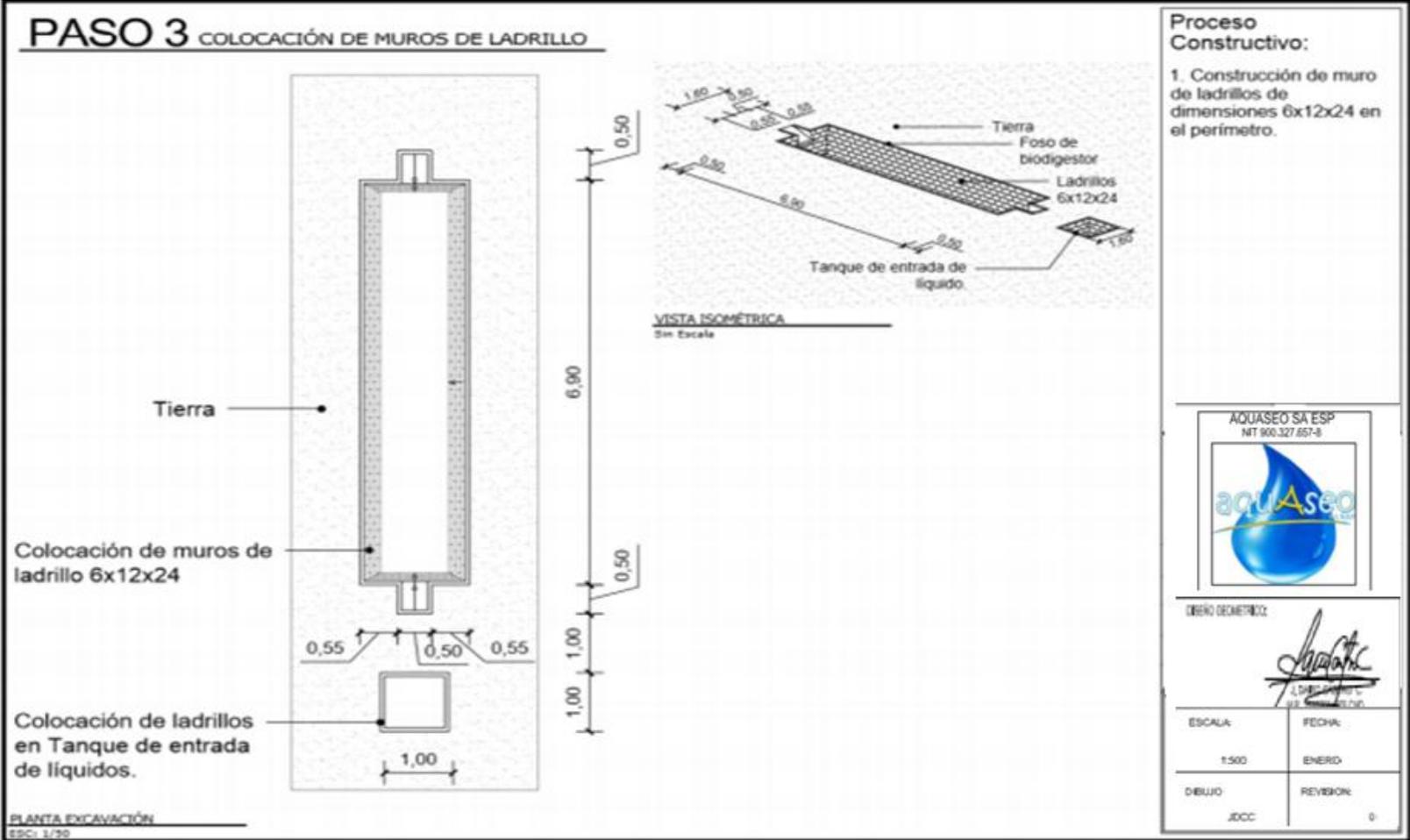
Anexo 5. Excavación.



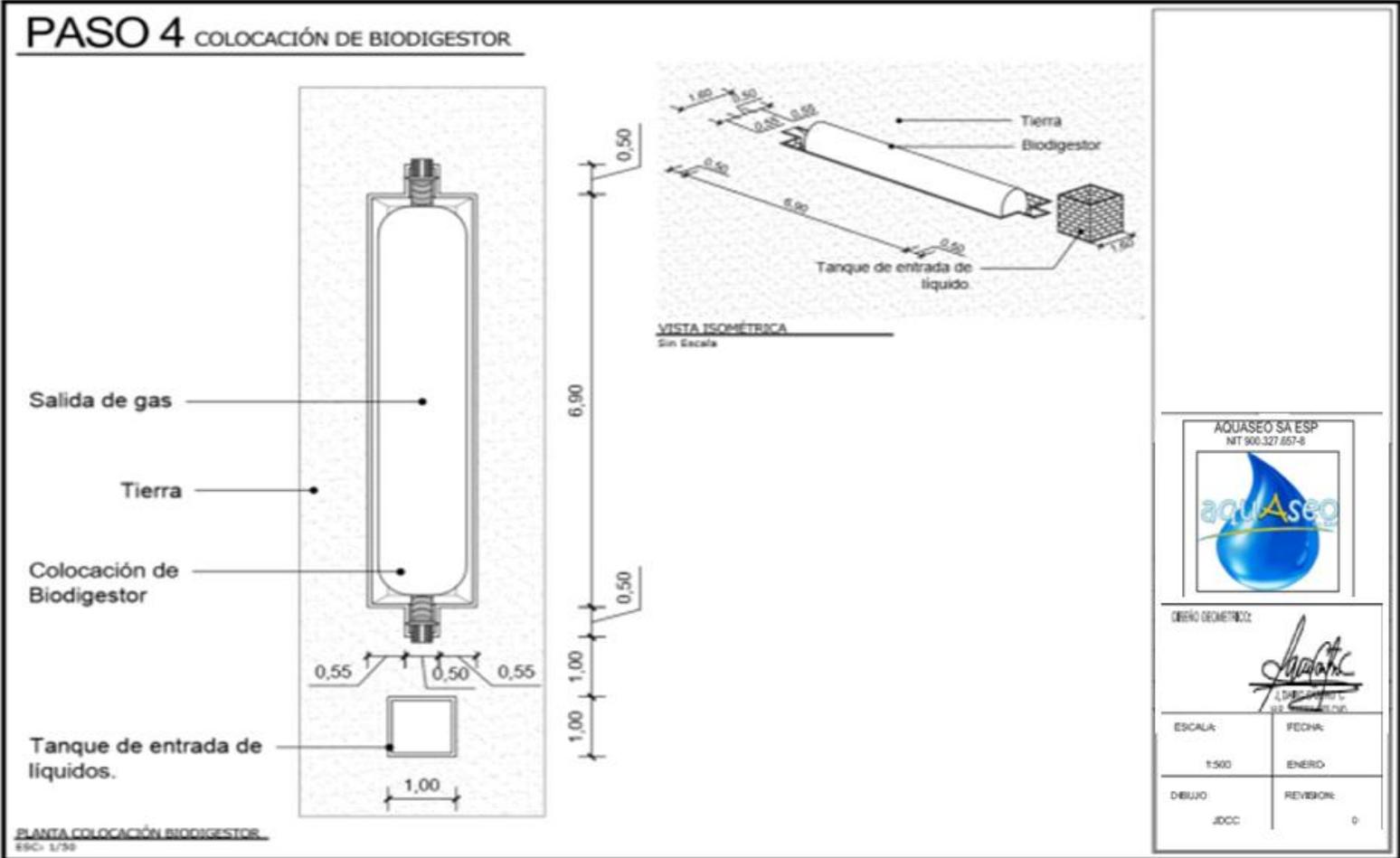
Anexo 6. Excavación Corte Longitudinal.



Anexo 7. Colocación Muros del Ladrillo.



Anexo 8. Colocación del Biodigestor.



Anexo 9. Conexiones

