

## **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

# **EVALUACIÓN DE UNA ALTERNATIVA TECNOLÓGICA PARA UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE CERDOS BAJO EL ENFOQUE DE TRATAMIENTO Y APROVECHAMIENTO DE LOS EFLUENTES GENERADOS**

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
para optar al Título de Ingeniero Químico  
por las Brs. Jenny G. Quintero G.  
y Nazareth de J. Velasco C.

Caracas, Noviembre de 2002

## **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

# **EVALUACIÓN DE UNA ALTERNATIVA TECNOLÓGICA PARA UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE CERDOS BAJO EL ENFOQUE DE TRATAMIENTO Y APROVECHAMIENTO DE LOS EFLUENTES GENERADOS**

**TUTORES:** Ing. Eudoro E. López  
Ing. José F. Fernández

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
para optar al Título de Ingeniero Químico  
por las Brs. Jenny G. Quintero G.  
y Nazareth de J. Velasco C.

Caracas, Noviembre de 2002

Caracas, Noviembre de 2002

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Química, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por las bachilleres Jenny G. Quintero G. y Nazareth de J. Velasco C., titulado:

**“Evaluación de una alternativa tecnológica para un sistema de producción de cerdos bajo el enfoque de tratamiento y aprovechamiento de los efluentes generados”**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Químico, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por los autores, lo declaran APROBADO.

**Prof. María Rincones**

Jurado

**Prof. Jhonny Vásquez**

Jurado

**Prof. Eudoro López**

Tutor

**Prof. José F. Fernández**

Tutor

**Quintero G., Jenny G.**  
**Velasco C., Nazareth de J.**

## **EVALUACIÓN DE UNA ALTERNATIVA TECNOLÓGICA PARA UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE CERDOS BAJO EL ENFOQUE DE TRATAMIENTO Y APROVECHAMIENTO DE LOS EFLUENTES GENERADOS**

**Tutores: Prof. José F. Fernández y Prof. Eudoro López.**

**Trabajo Especial de Grado. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería.**

**Escuela de Ingeniería Química. Año 2002, 168 pp.**

**Palabras Claves:** Sistemas Integrados de Tratamiento, Sostenibilidad, Digestión anaerobia, Biogas, Bioabono, Plantas acuáticas, Rentabilidad económica.

**Resumen.** La producción de cerdos genera residuos como agua de lavado, restos de alimentos, heces y orina, que al ser descargados a cuerpos de agua producen un impacto sobre el lugar de disposición, lo cual afecta la calidad del agua y del suelo. Es por ello que la explotación porcina requiere de un sistema de tratamiento del efluente generado, implicando mayores gastos al productor ya que se suelen emplear los sistemas convencionales de tratamiento de aguas residuales. Sin embargo, existen diferentes alternativas para reciclar líquidos residuales de la crianza porcina que aprovechan tales desechos a través de la generación de subproductos, tal es el caso de los sistemas integrados, dentro de ellos están los anaerobios, en los cuales se genera biogas y un residuo sólido-líquido que posee las propiedades de abono orgánico. De esta manera, en lugar de considerar los desechos porcinos como un problema, se convierten en fuente de recursos útiles en la producción agropecuaria.

Desde 1998, en la población de San Javier, Edo. Yaracuy, funciona un sistema de tratamiento integral del efluente generado en una granja experimental de cerdos (Modelo Físico de Agricultura Tropical Sostenible ATS) perteneciente a la Fundación POLAR. Dicha granja posee un sistema de tratamiento compuesto por un biodigestor plástico tubular de 36 m<sup>3</sup> de capacidad y ocho lagunas de 93 m<sup>3</sup> de capacidad cada una destinadas al cultivo de plantas acuáticas que forman parte de la dieta de los cerdos conjuntamente con grano de soya, jugo de caña o suero verde, vitaminas y minerales y ACPA (aceite crudo de palma). En el biodigestor se genera biogas empleado en la cocción de alimentos y en la calefacción de los lechones, además, se genera un efluente líquido que se distribuye en las lagunas y que posteriormente se emplea en el riego de cultivos.

El objetivo del presente trabajo es evaluar el sistema de tratamiento anteriormente descrito, debido a que se desconoce el funcionamiento del mismo como sistema de

descontaminación y productivo. La experiencia obtenida a través de la evaluación del sistema de tratamiento permitirá validar la sostenibilidad de este modelo de producción agrícola, bajo un enfoque estratégico que permita contribuir con el desarrollo del país y el mejoramiento de la calidad de vida de la población actual y futura.

La evaluación del sistema de tratamiento se desarrolló básicamente en tres fases: la primera consistió en caracterizar el efluente generado en la unidad de cerdos; la segunda fase, en la cual se evaluó el funcionamiento del sistema de tratamiento y, finalmente, la tercera fase en la que se realizó el estudio económico del sistema.

La primera fase partió del conocimiento detallado del manejo y limpieza de los cerdos a través de la observación del funcionamiento de la unidad porcina, para así definir un plan de muestreo representativo del sistema en estudio. Este plan contempló obtener los parámetros hidráulicos (caudal), físico-químicos, así como los biológicos que permiten caracterizar dicho efluente y determinar su calidad. El resultado obtenido en la caracterización del efluente a través de seis (6) campañas de muestreo en el transcurso de diez meses, la recopilación de información acerca del sistema biodigestor-lagunas y la documentación de experiencias similares con dicho sistema, permitieron evaluar el funcionamiento del sistema de descontaminación, evaluación que contempló la determinación de los parámetros de operación del sistema (tiempo de retención, carga aplicada y tasa de dilución), la caracterización de la salida del biodigestor y de las lagunas, así como la determinación de la cantidad y calidad de los subproductos generados en el sistema de descontaminación. La tercera fase, correspondiente al estudio económico del sistema es de vital importancia, pues en el mismo se generan subproductos que se aprovechan dentro de la unidad porcina.

La caracterización físico-química del efluente proveniente de la unidad de cerdos, permitió definir a dicho líquido residual como altamente agresivo (DBO<sub>5,20</sub> promedio 12175 mg/l y DQO promedio 42567 mg/l), lo cual pone de manifiesto la necesidad de tratamiento como medida de protección al ambiente y el aprovechamiento de los subproductos generados como consecuencia del tratamiento. El elevado contenido de materia orgánica puede atribuirse a la dieta particular empleada en la granja experimental, si se compara con los valores reportados para granjas porcinas convencionales.

En el biodigestor plástico se remueve 98% de la DBO<sub>5,20</sub> y 95% de DQO además de generar entre 5,7 y 8,5 m<sup>3</sup> de biogas constituido principalmente por metano (65%) y dióxido de carbono (28%).

Se determinó que las lagunas reciben baja carga orgánica de 2,7 kg DBO<sub>5,20</sub>/Ha.día; sin embargo, representan el medio donde se desarrollan y cosechan las plantas acuáticas *Azolla* y *Lemna*, fuente de proteínas en la dieta de los cerdos. Así mismo, el agua proveniente de las lagunas puede destinarse para riego de cultivos no destinados al consumo humano y para uso pecuario, según lo dispuesto en el Decreto 883.

El lodo extraído del biodigestor al cabo del período de retención puede ser utilizado como complemento de abono ya que presenta 39,7 g Nitrógeno/Kg, 18,9 g Potasio/kg y 3,13 g Fósforo/ Kg en base seca.

El análisis económico efectuado demostró que el sistema de producción integral propuesto, para una población de diseño de 130 cerdos es rentable, recuperándose a inversión inicial en 7 años y generando utilidades desde el primer año. Así mismo al compararlo con un sistema convencional de cría de cerdos con igual número de animales resultó con una mayor rentabilidad

El desarrollo del presente trabajo permite afirmar que el aprovechamiento de los desechos, mediante la generación y utilización de subproductos en el sistema de tratamiento integrado y el uso de recursos propios del trópico, benefician al sistema de producción de cerdos, considerándose dicha propuesta ambientalmente favorable, técnicamente factible, económicamente rentable y socialmente pertinente, recomendándose su divulgación y promoción en las comunidades en pro del mejoramiento de su calidad de vida e incentivo de la producción nacional.

|   | Pág |
|---|-----|
| <b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>  | v   |
| <b>ÍNDICE DE TABLAS</b>   | vii |
| <b>LISTA DE SÍMBOLOS</b>  | x   |
| <b>1. INTRODUCCIÓN</b>  | 1   |
| <b>2. FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN</b>   | 3   |
| <b>2.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>  | 3   |
| <b>2.2. OBJETIVO GENERAL</b>  | 4   |
| <b>2.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b>   | 4   |
| <b>3. MARCO TEÓRICO</b>   | 5   |
| <b>3.1. CRÍA DE CERDOS</b>  | 5   |
| <b>3.2. TIPOS DE CERDOS EN LA GRANJA</b>  | 6   |
| <b>3.3. EFECTOS DE LA PRODUCCIÓN PORCINA Y POTENCIAL<br/>    DE LOS DESECHOS PRODUCIDOS</b> | 10  |
| <b>3.3.1. Tasas de excreción porcinas</b>   | 13  |
| <b>3.3.2. Características de los efluentes porcinos</b>                                     | 16  |
| <b>3.3.2.1. Parámetros Físicos</b>  | 16  |
| <b>3.3.2.2. Parámetros Físico-químicos</b>  | 18  |
| <b>3.3.2.3. Parámetros Biológicos</b>   | 23  |
| <b>3.4. NORMATIVA AMBIENTAL</b>   | 25  |
| <b>3.4.1. Normativa para vertidos a cuerpos de agua</b>                                     | 26  |
| <b>3.4.2. Normativa para aguas de usos agropecuarios</b>                                    | 26  |
| <b>3.5. SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES</b>                                     | 27  |
| <b>3.5.1. Sistemas convencionales de tratamiento de aguas residuales</b>                    | 31  |
| <b>a) Reactor de Flujo Ascendente</b>   | 32  |
| <b>b) Lodos Activados</b>   | 33  |
| <b>c) Lechos percoladores</b>   | 33  |
| <b>d) Lagunas de estabilización</b>   | 33  |

|   | Pág.      |
|---|-----------|
| <b>3.5.2. Sistemas integrados de tratamiento de aguas</b>                             | <b>34</b> |
| <b>3.5.2.1. Biodigestores</b>   | <b>37</b> |
| <b>3.5.2.2. Canales de Plantas Acuáticas</b>  | <b>39</b> |
| <i>Lemma minor</i>  | 40        |
| <i>Azolla – Anabaena</i>  | 42        |
| <b>3.5.2.3. Cultivos Agrícolas Asociados</b>  | <b>43</b> |
| <b>3.5.2.4. Policultivos de peces</b>   | <b>44</b> |
| <b>3.6. LA SOSTENIBILIDAD</b>   | <b>44</b> |
| <b>3.6.1. ¿Qué es la sostenibilidad?</b>  | <b>45</b> |
| <b>3.6.2. Beneficios de la Sostenibilidad</b>   | <b>46</b> |
| <b>3.7. ASPECTOS DE LA DISGESTIÓN ANAEROBIA</b>                                       | <b>47</b> |
| <b>3.8. ANTECEDENTES DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES DE GRANJAS PORCINAS EN VENEZUELA</b> | <b>53</b> |
| <b>4. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA</b>   | <b>56</b> |
| <b>4.1. LOCALIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LA GRANJA PORCINA</b>                           | <b>56</b> |
| <b>4.2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE DESCONTAMINACIÓN</b>                               | <b>63</b> |
| <i>Consideraciones para la instalación y manejo del biodigestor plástico</i>          | 68        |
| <b>5. METODOLOGÍA</b>   | <b>71</b> |
| <b>5.1. CAPTACIÓN DE MUESTRAS</b>   | <b>72</b> |
| <b>5.1.1. Entrada al biodigestor</b>  | <b>72</b> |
| <b>5.1.2. Salida del biodigestor</b>  | <b>73</b> |
| <b>5.1.3. Lagunas</b>   | <b>75</b> |
| <b>5.1.4. Biogas</b>  | <b>75</b> |
| <b>5.2. DETERMINACIÓN DEL CAUDAL DE LÍQUIDO</b>                                       | <b>75</b> |
| <b>5.3. DETERMINACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS</b>                                  | <b>76</b> |
| <b>5.4. ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICO</b>   | <b>76</b> |
| <b>5.4.1. Análisis de aguas</b>   | <b>77</b> |
| <b>5.4.1.1. Análisis en situ</b>  | <b>77</b> |

|   | Pág.       |
|---|------------|
| 5.4.1.2. Análisis en el laboratorio                           | 78         |
| 5.4.2. Análisis bacteriológico                                | 80         |
| 5.4.3. Análisis del biogas                                    | 80         |
| 5.4.4. Análisis de las plantas acuáticas                      | 81         |
| 5.5. ANÁLISIS ECONÓMICO                                       | 82         |
| <b>6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b>                             | <b>83</b>  |
| 6.1. CARACTERIZACIÓN DE LA POBLACIÓN DE CERDOS                | 83         |
| 6.2. CUANTIFICACIÓN HIDRÁULICA                                | 87         |
| 6.3. CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA                           | 90         |
| 6.3.1. Afluente o entrada del biodigestor                     | 90         |
| 6.3.2. Efluente o salida del biodigestor                      | 105        |
| 6.3.3. Lagunas  | 115        |
| 6.4. PARÁMETROS BIOLÓGICOS                                    | 117        |
| 6.5. SUBPRODUCTOS DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO                  | 119        |
| 6.5.1. Biogas   | 119        |
| 6.5.2. Bioabono   | 122        |
| 6.5.3. Plantas acuáticas                                      | 123        |
| 6.6. CONSIDERACIONES EN EL MANEJO DEL BIODIGESTOR<br>PLÁSTICO | 126        |
| 6.7. ESTUDIO ECONÓMICO  | 127        |
| <b>7. CONCLUSIONES</b>  | <b>141</b> |
| <b>8. RECOMENDACIONES</b>                                     | <b>144</b> |
| <b>BIBLIOGRAFÍA</b>   | <b>145</b> |
| <b>ANEXO I</b>  | <b>154</b> |
| <b>ANEXO II</b>   | <b>157</b> |
| <b>ANEXO III</b>  | <b>159</b> |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|  | <b>Pág.</b> |
|--|-------------|
| <b>Figura N°3.1:</b> Semental  | 7           |
| <b>Figura N°3.2:</b> Lechones  | 8           |
| <b>Figura N°3.3:</b> Destetes  | 8           |
| <b>Figura N°3.4:</b> Cerdos en crecimiento   | 9           |
| <b>Figura N°3.5:</b> Cerdos de ceba  | 9           |
| <b>Figura N°3.6:</b> Tasas de excreción diaria de los cerdos   | 14          |
| <b>Figura N°3.7:</b> Distribución porcentual de excretas en una unidad de producción porcina                                     | 15          |
| <b>Figura N°3.8:</b> Ejercicio de la DBO   | 19          |
| <b>Figura N°3.9:</b> Representación de un Sistema Integrado  | 36          |
| <b>Figura N°3.10:</b> Marco conceptual para ilustrar la búsqueda de soluciones sostenibles                                       | 46          |
| <b>Figura N°4.1:</b> Localización de la Fundación DANAC en la región Centro-Occidental de Venezuela                              | 56          |
| <b>Figura N°4.2:</b> Distribución de los corrales en la granja   | 58          |
| <b>Figura N°4.3:</b> Lavado y mantenimiento de instalaciones   | 62          |
| <b>Figura N°4.4:</b> Biodigestor plástico de flujo continuo  | 63          |
| <b>Figura N°4.5:</b> Lagunas productoras de <i>Azolla</i> y <i>Lemna</i>   | 64          |
| <b>Figura N°4.6:</b> Biodigestor plástico  | 65          |
| <b>Figura N°4.7:</b> Tanquillas de entrada y salida  | 67          |
| <b>Figura N°5.1:</b> Captación del efluente de la unidad de cerdos   | 73          |
| <b>Figura N°5.2:</b> Mezclado del agua de lavado con excretas  | 73          |
| <b>Figura N°5.3:</b> Croquis de la red de distribución de efluentes en el Modelo Físico de Agricultura Tropical Sostenible (ATS) | 74          |
| <b>Figura N°5.4:</b> Tanquilla octogonal   | 74          |

|   | <b>Pág.</b> |
|---|-------------|
| <b>Figura N°5.5:</b> Captación del biogas                                     | <b>75</b>   |
| <b>Figura N°5.6:</b> Análisis in situ   | <b>77</b>   |
| <b>Figura N°5.7:</b> Determinación de sulfuro de hidrógeno (H <sub>2</sub> S) | <b>81</b>   |
| <b>Figura N°6.1:</b> Demanda de oxígeno para el afluente, 29/06/2002          | <b>103</b>  |
| <b>Figura N°6.2:</b> Demanda de oxígeno para el afluente, 04/09/2002          | <b>104</b>  |
| <b>Figura N°6.3:</b> Demanda de oxígeno para el efluente, 26/01/2002          | <b>109</b>  |
| <b>Figura N°6.4:</b> Demanda de oxígeno para el efluente, 23/02/2002          | <b>109</b>  |
| <b>Figura N°6.5:</b> Demanda de oxígeno para el efluente, 27/04/2002          | <b>110</b>  |
| <b>Figura N°6.6:</b> Demanda de oxígeno para el efluente, 29/06/2002          | <b>110</b>  |
| <b>Figura N°6.7:</b> Demanda de oxígeno para el efluente, 19/07/2002          | <b>111</b>  |
| <b>Figura N°6.8:</b> Demanda de oxígeno para el efluente, 04/09/2002          | <b>111</b>  |
| <b>Figura N°A1:</b> Biodigestor   | <b>157</b>  |

## ÍNDICE DE TABLAS

|   | Pág. |
|---|------|
| <b>Tabla N°3.1:</b> Recursos presentes en los desechos porcinos de una explotación de levante y ceba                                      | 12   |
| <b>Tabla N°3.2:</b> Tasa diaria de excreción (Kg estiércol/100 Kg PV)   | 13   |
| <b>Tabla N°3.3:</b> Producción de heces y orina procedentes de diferentes tipos de cerdos   | 15   |
| <b>Tabla N°3.4.</b> Demanda última carbonácea de oxígeno y constante de oxidación   | 20   |
| <b>Tabla N°3.5:</b> Comparación de características de efluentes líquidos generados en granjas porcinas de Venezuela                       | 25   |
| <b>Tabla N°3.6:</b> Clasificación de los Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales  | 29   |
| <b>Tabla N°3.7:</b> Comparación entre sistemas aerobios y anaerobios de tratamiento de aguas residuales                                   | 31   |
| <b>Tabla N°3.8:</b> Composición de los nutrientes de la <i>Lemna minor</i> y la <i>Azolla-Anabaena</i>                                    | 40   |
| <b>Tabla N°4.1:</b> Composición química de la caña de azúcar  | 60   |
| <b>Tabla N°4.2:</b> Análisis típico de semilla y productos de proteína de soya  | 60   |
| <b>Tabla N°4.3:</b> Suministro de alimentos por cerdo   | 61   |
| <b>Tabla N°4.4:</b> Composición y aportes de la dieta de cerdas de cría del Modelo Físico   | 62   |
| <b>Tabla N°4.5:</b> Sistematización de actividades en la producción de cerdos del Modelo Físico de ATS                                    | 63   |
| <b>Tabla N°4.6:</b> Dimensiones de los estanques para la producción de plantas acuáticas en el Subsistema Cerdos del Modelo Físico de ATS | 64   |
| <b>Tabla N°5.1:</b> Metodología Analítica empleada para determinar los parámetros de caracterización de efluentes de granjas porcinas     | 79   |

|   | <b>Pág.</b> |
|---|-------------|
| <b>Tabla N°6.1:</b> Distribución de la población de cerdos                              | <b>84</b>   |
| <b>Tabla N°6.2:</b> Distribución de pesos de los cerdos                                 | <b>85</b>   |
| <b>Tabla N°6.3:</b> Dieta del Modelo Físico   | <b>86</b>   |
| <b>Tabla N°6.4:</b> Parámetros de operación   | <b>88</b>   |
| <b>Tabla N°6.5:</b> Parámetros físico-químicos del afluente o entrada al biodigestor    | <b>91</b>   |
| <b>Tabla N°6.6:</b> Distribución porcentual de sólidos                                  | <b>95</b>   |
| <b>Tabla N°6.7:</b> Muestra preparada en el laboratorio excretas mas agua               | <b>98</b>   |
| <b>Tabla N°6.8:</b> Aportes unitarios por cerdo   | <b>98</b>   |
| <b>Tabla N°6.9:</b> Aportes unitarios de diferentes granjas                             | <b>100</b>  |
| <b>Tabla N°6.10:</b> Demanda última de oxígeno en el afluente del biodigestor           | <b>103</b>  |
| <b>Tabla N°6.11:</b> Constante de velocidad de oxidación (agua de lavado)               | <b>103</b>  |
| <b>Tabla N°6.12:</b> Constante de velocidad de oxidación (excretas + agua)              | <b>103</b>  |
| <b>Tabla N°6.13:</b> Demanda última de oxígeno en el afluente del biodigestor           | <b>104</b>  |
| <b>Tabla N°6.14:</b> Constante de velocidad de oxidación en el afluente del biodigestor | <b>105</b>  |
| <b>Tabla N°6.15:</b> Parámetros físico-químicos del efluente o salida del biodigestor   | <b>107</b>  |
| <b>Tabla N°6.16:</b> Demanda última de oxígeno en el efluente del biodigestor           | <b>112</b>  |
| <b>Tabla N°6.17:</b> Constante de velocidad de oxidación en el efluente del biodigestor | <b>113</b>  |
| <b>Tabla N°6.18:</b> Eficiencia del biodigestor   | <b>114</b>  |
| <b>Tabla N°6.19:</b> Parámetros físico-químicos de las lagunas                          | <b>116</b>  |
| <b>Tabla N°6.20:</b> Parámetros biológicos a la entrada del biodigestor                 | <b>117</b>  |
| <b>Tabla N°6.21:</b> Parámetros biológicos a la salida del biodigestor                  | <b>117</b>  |
| <b>Tabla N°6.22:</b> Parámetros biológicos en las lagunas                               | <b>118</b>  |
| <b>Tabla N°6.23:</b> Comparación con la normativa de riego                              | <b>119</b>  |
| <b>Tabla N°6.24:</b> Composición del biogas   | <b>120</b>  |
| <b>Tabla N°6.25:</b> Análisis de H <sub>2</sub> S en laboratorio                        | <b>120</b>  |
| <b>Tabla N°6.26:</b> Análisis de H <sub>2</sub> S en campo                              | <b>121</b>  |
| <b>Tabla N°6.27:</b> Composición del bioabono   | <b>123</b>  |

|   | <b>Pág.</b> |
|---|-------------|
| <b>Tabla N°6.28:</b> Composición de las plantas acuáticas <i>Azolla - Lemna</i>                                   | <b>123</b>  |
| <b>Tabla N°6.29:</b> Composición de la <i>Lemna</i>   | <b>124</b>  |
| <b>Tabla N°6.30:</b> Composición de la <i>Azolla</i>  | <b>126</b>  |
| <b>Tabla N°6.31:</b> Dieta del Verraco  | <b>130</b>  |
| <b>Tabla N°6.32:</b> Dieta de las Cerdas  | <b>130</b>  |
| <b>Tabla N°6.33:</b> Destete  | <b>131</b>  |
| <b>Tabla N°6.34:</b> Cerdos de ceba   | <b>131</b>  |
| <b>Tabla N°6.35:</b> Precio de la alimentación de los cerdos  | <b>131</b>  |
| <b>Tabla N°6.36:</b> Gasto anual de la alimentación del verraco   | <b>132</b>  |
| <b>Tabla N°6.37:</b> Gasto anual de la alimentación de las madres   | <b>132</b>  |
| <b>Tabla N°6.38:</b> Gastos de alimentos en destete   | <b>133</b>  |
| <b>Tabla N°6.39:</b> Gastos de alimentos en fase de engorde   | <b>133</b>  |
| <b>Tabla N°6.40:</b> Índices económicos   | <b>139</b>  |
| <b>Tabla N°AI:</b> Demanda última de oxígeno en la entrada del biodigestor  | <b>154</b>  |
| <b>Tabla N°AII:</b> Constante de velocidad de oxidación (agua de lavado)  | <b>154</b>  |
| <b>Tabla N°AIII:</b> Constante de velocidad de oxidación (excretas + agua)  | <b>155</b>  |
| <b>Tabla N°AIV:</b> Demanda última de oxígeno y constante de velocidad de oxidación en la entrada del biodigestor | <b>155</b>  |
| <b>Tabla N°AV:</b> Demanda última de oxígeno y constante de velocidad de oxidación en la salida del biodigestor   | <b>156</b>  |
| <b>Tabla N°AVI:</b> Flujo de caja del Modelo Físico con 131 cerdos  | <b>160</b>  |
| <b>Tabla N°AVII:</b> Flujo de caja del Modelo Físico con 107 cerdos   | <b>163</b>  |
| <b>Tabla N°AVIII:</b> Flujo de caja de granja convencional con 131 cerdos   | <b>166</b>  |

---

**LISTA DE SÍMBOLOS**

|                       |  |
|-----------------------|--|
| <b>ACPA</b>           | <b>Aceite Crudo de Palma Africana</b>  |
| <b>ATS</b>            | <b>Agricultura Tropical Sostenible</b>   |
| <b>CIPAV</b>          | <b>Convenio Interinstitucional para la Producción Agropecuaria en el Valle del Rio Cauca.</b>              |
| <b>CFT</b>            | <b>Coliformes Fecales, NMP/100ml</b>   |
| <b>DANAC</b>          | <b>Fundación para la Investigación Agrícola</b>  |
| <b>DBO</b>            | <b>Demanda Bioquímica de Oxígeno, mg/l</b>   |
| <b>DeT</b>            | <b>Demanda Última de Oxígeno Total, mg/l</b>   |
| <b>DQO</b>            | <b>Demanda Química de Oxígeno, mg/l</b>  |
| <b>EB</b>             | <b>Energía Bruta, Kcal/g</b>   |
| <b>ELN</b>            | <b>Extracto libre de nitrógeno</b>   |
| <b>EM</b>             | <b>Energía Metabolizable, Mcal/kg MS</b>   |
| <b>EMA</b>            | <b>Energía Metabolizable Aparente, Mcal/kg MS</b>  |
| <b>EPA</b>            | <b>Equivalente de Población Animal por 100 Kg de peso vivo</b>   |
| <b>L</b>              | <b>Demanda última carbonácea de oxígeno, mgO<sub>2</sub>/l</b>   |
| <b>k<sub>OT</sub></b> | <b>Constante de velocidad de oxidación para DeT, día<sup>-1</sup></b>                                      |
| <b>k<sub>10</sub></b> | <b>Constante de velocidad de oxidación para L, día<sup>-1</sup></b>  |
| <b>MF</b>             | <b>Materia Fresca, Kg</b>  |
| <b>MO</b>             | <b>Materia Orgánica, Kg</b>  |
| <b>MS</b>             | <b>Materia Seca, Kg</b>  |
| <b>NMP</b>            | <b>Número Más Probable (término estadístico para cuantificación de indicadores de contaminación fecal)</b> |
| <b>NTK</b>            | <b>Nitrógeno Total Kjeldahl, mg N/l</b>  |
| <b>OD</b>             | <b>Oxígeno Disuelto, mg/l</b>  |
| <b>P</b>              | <b>Presión, atm</b>  |
| <b>PC</b>             | <b>Proteína Cruda, g/Kg MS</b>   |
| <b>PE</b>             | <b>Población Equivalente</b>   |
| <b>PETA</b>           | <b>Planta Experimental de Tratamiento de Aguas</b>   |

|             |   |
|-------------|---|
| <b>PV</b>   | <b>Peso vivo, Kg</b>                                      |
| <b>Q</b>    | <b>Caudal afluente, l/min</b>                             |
| <b>Qe</b>   | <b>Caudal efluente, l/min</b>                             |
| <b>SDF</b>  | <b>Sólidos Disueltos Fijos, mg/l</b>                      |
| <b>SDT</b>  | <b>Sólidos Disueltos Totales, mg/l</b>                    |
| <b>SDV</b>  | <b>Sólidos Disueltos Volátiles, mg/l</b>                  |
| <b>SFL</b>  | <b>Sólidos Flotantes, ml/l</b>                            |
| <b>SFT</b>  | <b>Sólidos Fijos Totales, mg/l</b>                        |
| <b>SS</b>   | <b>Sólidos Sedimentables, ml/l</b>                        |
| <b>SSF</b>  | <b>Sólidos Suspendidos Fijos, mg/l</b>                    |
| <b>SSV</b>  | <b>Sólidos Suspendidos Volátiles, mg/l</b>                |
| <b>SST</b>  | <b>Sólidos Suspendidos Totales, mg/l</b>                  |
| <b>STT</b>  | <b>Sólidos Totales, mg/l</b>                              |
| <b>SVT</b>  | <b>Sólidos Volátiles Totales, mg/l</b>                    |
| <b>T</b>    | <b>Temperatura, °C</b>                                    |
| <b>TAN</b>  | <b>Nitrógeno Amoniacal Total, mgN/l</b>                   |
| <b>TKK</b>  | <b>Potasio Total, mg/l</b>                                |
| <b>TON</b>  | <b>Nitrógeno Orgánico, mg N/l</b>                         |
| <b>TPP</b>  | <b>Fósforo Total, mg/l</b>                                |
| <b>TRH</b>  | <b>Tiempo de Retención Hidráulico, día</b>                |
| <b>TRSB</b> | <b>Tiempo de Retención de los Sólidos Biológicos, día</b> |
| <b>UPA</b>  | <b>Unidad de Producción Animal, 100 Kg de PV</b>          |
| <b>VD</b>   | <b>Volumen del digestor, m<sup>3</sup></b>                |

## ***1. INTRODUCCIÓN***

La producción de cerdos genera principalmente agua de lavado, restos de alimentos, heces y orina, que al ser descargados a cuerpos de agua producen un impacto sobre el lugar de disposición, lo cual afecta la calidad del agua y del suelo. Es por ello que la explotación porcina requiere de un sistema de tratamiento del efluente generado, implicando mayores gastos al productor ya que se suelen emplear los conocidos sistemas convencionales de tratamiento de residuales.

Sin embargo, existen diferentes alternativas para reciclar dichos líquidos residuales de la crianza porcina, los cuales aprovechan tales desechos a través de la generación de subproductos, tal es el caso de los sistemas anaerobios en los cuales se genera biogas y el residuo sólido siendo materia orgánica estabilizada, posee las propiedades de un complemento de abono orgánico. De esta manera, en lugar de considerar los desechos porcinos un problema, se convierten en una fuente de recursos útiles en la producción agropecuaria.

La aplicación de uno u otro modelo depende de las condiciones, propósitos deseados y los recursos disponibles. En cualquier esquema el objetivo principal es la descontaminación ambiental unido al aprovechamiento de los desechos generados. Se supone que la crianza de cerdos es la actividad agropecuaria que permite la mayor recuperación de residuales potencialmente utilizables.

Se ha estimado la ganancia neta y el porcentaje de retorno de diferentes sistemas integrados de reciclaje de líquidos residuales, procedentes de la crianza animal a pequeña escala. No es precisamente la complejidad de los sistemas lo que genera mayor ganancia, sino que es necesario considerar los recursos disponibles, las necesidades humanas y la sostenibilidad de los diferentes sistemas. Sin embargo, el cerdo en cualquiera de las variantes resulta el corazón del sistema, y aporta la mayor parte de las ganancias.

Desde 1998, en la población de San Javier, Edo. Yaracuy, comenzó a funcionar un sistema de tratamiento integral del efluente generado en una granja de cerdos experimental, perteneciente a la Fundación POLAR. Este modelo constituye un sistema en el que se interconectan las actividades domésticas del agricultor con las actividades productivas agrícolas y pecuarias, mediante la aplicación de tecnologías menos agresivas con el ambiente y la utilización de fuentes de energía no convencionales. Entre sus objetivos se pretende servir de unidad demostrativa, permitiendo desarrollar y divulgar el conocimiento en sistemas de descontaminación con fines productivos.

Dicha granja porcina posee un sistema de tratamiento compuesto básicamente por un biodigestor plástico tubular y ocho lagunas de estabilización destinadas al cultivo de plantas acuáticas que integran parcialmente la dieta de los cerdos. Dentro del biodigestor se genera biogas empleado en la cocción de alimentos y en calefacción, así como un residuo líquido, que se distribuye en las lagunas y que posteriormente se emplea para riego de cultivos.

El objetivo del presente Trabajo Especial de Grado es evaluar el sistema de tratamiento de efluentes, debido a que se desconoce el funcionamiento del mismo como sistema de descontaminación. Para ello, es importante determinar su eficiencia, lo que requiere conocer la operación de la granja experimental, caracterizar el efluente proveniente de la unidad de cerdos así como el resultante del tratamiento. Debido a que este sistema incluye subproductos aprovechables, estos se evalúan de manera de verificar su aporte y rentabilidad dentro del ciclo productivo.

Las experiencias obtenidas a través de la evaluación del sistema de tratamiento contribuyen a validar la sostenibilidad de este sistema de producción agrícola, bajo un enfoque estratégico que permita contribuir con el desarrollo agrícola del país y el mejoramiento de la calidad de vida de la población actual y futura.

## ***2. FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN***

En este capítulo se presenta el planteamiento del problema y se desarrollan los objetivos que se persiguen a través de esta investigación.

### ***2.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA***

Las granjas de cerdos generan efluentes los cuales contaminan aguas y suelos significativamente. Por lo general, dichos efluentes se tratan mediante los conocidos sistemas convencionales, representando un costo adicional en la producción de estos animales. Sin embargo, estos desechos se pueden aprovechar con el uso de sistemas en donde se generan recursos reutilizables dentro de las mismas granjas.

Gracias a investigaciones y adaptaciones de tecnología se ha logrado adoptar sistemas integrados de tratamiento de aguas residuales donde se obtienen subproductos como biogas, bioabono y plantas acuáticas (fuente de proteína). Estos sistemas representan una alternativa tecnológica en equilibrio con el medio ambiente, así como una vía de autosostenimiento para pequeños y medianos productores.

Considerando la alternativa antes mencionada, Fundación POLAR diseñó un modelo experimental constituido por una granja de cerdos, un biodigestor plástico y ocho lagunas productoras de plantas acuáticas. Sin embargo, no se disponen en la actualidad de datos físico-químicos y biológicos que describan el funcionamiento de este sistema, por lo que surge la necesidad de realizar una evaluación del sistema de tratamiento en cuanto a remoción de materia orgánica, calidad del efluente líquido, requerimientos de operación y mantenimiento, entre otros factores que permitan determinar la efectividad de dicha propuesta. Por estas razones el presente Trabajo Especial de Grado busca la solución del problema planteado a través del logro de los siguientes objetivos.

## **2.2. OBJETIVO GENERAL**

Evaluar una alternativa tecnológica para la producción de cerdos bajo el enfoque de tratamiento y aprovechamiento de los efluentes generados en una granja experimental.

## **2.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Conocer la operación de la granja experimental.
- Recopilar información acerca del funcionamiento y mantenimiento del sistema de tratamiento biodigestor plástico – lagunas.
- Realizar la caracterización de los efluentes generados en la unidad porcina.
- Evaluar el funcionamiento y los requerimientos de operación y mantenimiento del sistema biodigestor – laguna presente en la granja experimental.
- Evaluar las características de los subproductos generados en el sistema de tratamiento de efluentes.
- Evaluar el aporte y contenido energético de las plantas acuáticas producidas en las lagunas en relación a los requerimientos alimenticios de la unidad porcina.
- Determinar la cantidad y calidad del agua generada en el sistema de tratamiento.
- Definir y analizar la incidencia del aprovechamiento de los subproductos en el ciclo de producción.
- Realizar un estudio económico al sistema de producción existente.

### ***3. MARCO TEÓRICO***

A continuación se exponen los fundamentos que se refieren a la cría de cerdos, efectos de la producción porcina, normativa ambiental, sistemas de tratamiento convencionales e integrados de aguas residuales, respaldo teórico que permite un mejor entendimiento del propósito y desarrollo del presente Trabajo Especial de Grado.

#### ***3.1. CRÍA DE CERDOS***

Los sistemas de producción porcina pueden ser extensivos, semi-intensivos e intensivos, dependiendo del grado de desarrollo tecnológico en cuanto a mano de obra requerida, fines de producción y otros. En cuanto a las características de operación, entre los factores más importantes están las construcciones y edificaciones, tipo de alimentación suministrada a los cerdos y formas de eliminación de los residuos generados tanto sólidos como líquidos, es decir, heces, orina, agua de lavado, residuos de alimentos, entre otros.

De cumplirse cabalmente la vacunación contra las enfermedades, el siguiente aspecto a cubrir en la cría satisfactoria es el buen manejo en alimentación, buen cálculo en las instalaciones y un apropiado ambiente, por ello se debe llevar a cabo un estricto cuidado en el control y manejo del animal, sobre todo en la limpieza, para garantizar una población saludable que genera mayor producción, favoreciendo a los granjeros y a los consumidores.

Las construcciones deben contemplar el manejo y comodidad de los animales, facilidades para los encargados en la operación de la granja y fácil disposición del líquido residual.

La alimentación proporciona al animal, en cantidad y calidad, los nutrientes necesarios para el crecimiento y mantenimiento, así como para los fines de producción, variando en composición según la etapa de desarrollo; es por ello que en la descripción de la granja en estudio se clasificará la alimentación de los animales para las diferentes etapas de crecimiento, pues las tasas de excreción dependen de la dieta y del tipo de cerdo de cada corral.

La disposición de excretas y orina se ejecuta diariamente mediante arrastre con agua, formándose una masa diluida de fácil manejo, cuyas características más resaltantes son el elevado contenido de sólidos suspendidos y sedimentables, con alta carga polucional, concentración de materia orgánica carbonácea, nitrogenada y fósforo.

### ***3.2. TIPOS DE CERDOS EN LA GRANJA***

En una granja porcina de ciclo completo se realiza la producción y reproducción de cerdos, pudiéndose encontrar sementales, vientres, lechones, destetes, cerdos de engorde (crecimiento y finalización) y hembras primerizas.

A continuación se describen las características generales por cada uno de los tipos de cerdos mencionados.

- ***Semental, verraco de cría o padrote:***

Es el cerdo seleccionado especialmente de la piara o comprado en una granja de pie de cría con base en su comportamiento, vigorosidad y propiedades genéticas, un ejemplar se muestra en la Figura N°3.1. Los sementales alcanzan su madurez alrededor de los ocho meses de vida, pesando aproximadamente 160 kg o más.



**Figura N°3.1: Semental**

- ***Vientres o Cerdas:***

Son hembras maduras sexualmente con más de seis meses de edad, que pesan alrededor de 180 kg. Una vez que quedan preñadas se les pone en corrales individuales de gestación donde permanecen por tres meses, tres semanas y tres días (114 días, oscilando entre 111 ó 120 días) para parir una camada de ocho a doce lechones. Los partos de las cerdas suelen durar de dos a tres horas y la asistencia y cuidado del mismo se traduce en la disminución de la mortalidad de los lechones, pues los tres primeros días debido a diarreas, junto al aplastamiento de la cerda al amamantarlos pueden producir la muerte de los mismos. Es entonces, el área de maternidad la etapa más importante donde asean, pesan y cortan el cordón umbilical a los lechones cuando nacen.

- ***Lechones:***

Son los recién nacidos que permanecen en el corral de maternidad hasta que son destetados de su madre, tal como se muestra en la Figura N°3.2. Pesan entre 1 y 1,5 kg al nacer y alcanzan un peso de 4 a 7 kg antes de ser destetados. Los lechones son susceptibles a las enfermedades y a los cambios en la temperatura, a las heces y a las variaciones en el microclima de la nave de maternidad. Entre los lechones es normal una tasa de mortalidad de 10%; un 90% sobrevive para alcanzar el peso de destete. Lo fundamental en esta etapa es cuidar con esmero la vida de la camada y así

evitar que mueran por aplastamiento, frío, inanición o diarreas. Después de la lactancia, los lechones pasan a corrales especiales para cría.



**Figura N°3.2:** Lechones

- ***Destetes:***

Son lechones que han sido retirados de su madre y que permanecen en un corral de cría hasta alcanzar un peso de 25 kg, como se muestran en la Figura N°3.3. El proceso de destete, el traslado de lechones a nuevos corrales y la mezcla con lechones de otras camadas, genera tensiones que los hacen susceptibles a las enfermedades. Cerca del 97% de los destetes sobrevive al período de cría.



**Figura N°3.3:** Destetes

- ***Cerdos en crecimiento:***

Son animales de tres meses de edad que pesan de 25 a 30 kg; se les alimenta con formulaciones especiales hasta que alcanzan un peso de 55 kg, como se observa en la Figura. N° 3.4. Normalmente, más del 99% de los cerdos en crecimiento sobreviven en esta etapa.



**Figura N°3.4:** Cerdos en crecimiento

- ***Cerdos en finalización:***

Son los cerdos que se preparan para el mercado. Su peso puede variar de 55 kg al peso al cual son vendidos, como se observa en la Figura N°3.5. Normalmente, entre los cerdos en finalización hay menos de 1% de pérdidas por mortandad. La mayoría de las muertes ocurren durante la carga y transporte de animales al mercado, etapa de tensión, en particular cuando las condiciones climáticas son adversas.



**Figura N°3.5:** Cerdos de ceba

- *Hembras primerizas:*

Son hembras que se engordan hasta los 180 kg que es cuando alcanzan su madurez y reemplazan a las hembras viejas de la piara.

Se estima que hoy existen 90 razas reconocidas de cerdos, con más de 200 variedades, entre las que destacan Berkshire (negra con puntos blancos), Yorkshire (también llamada Blanca Grande), Duroc (roja), Hampshire (negra con un cinturón blanco) y Landrace (cerdo grande, largo y blanco). Las principales razas difieren también en su crecimiento, el número medio de lechones por camada, el tamaño corporal cuando alcanzan la madurez, capacidad para pastar y edad de la cerda. La mayor parte de la producción de cerdos se fundamenta en hibridación de los animales porque produce individuos más robustos y vigorosos. El sistema más usado es el cruce rotativo de dos o tres razas para obtener un animal pesado y grande, aproximadamente de 200 kg.

### ***3.3. EFECTOS DE LA PRODUCCIÓN PORCINA Y POTENCIAL DE LOS DESECHOS PRODUCIDOS***

La contaminación producida por una explotación porcina puede variar de acuerdo al estado fisiológico de los animales y al tipo de alimentación utilizada. El grado en que esta contaminación afecta las fuentes de agua depende de la cantidad de agua usada, la separación de sólidos y el manejo dado a los residuos.

Estos contaminantes en muchos casos, al menos en explotaciones porcinas tradicionales, es común que sean vertidos a algún río, quebrada o canal de drenaje cercano. Vale la pena examinar entonces, algunas características de la producción porcina en particular y de los sistemas productivos agropecuarios, en general, que estimulan la generación y vertimiento de residuos al ambiente.

Algunas de estas características se explican a continuación:

- Producción especializada con poca o nula integración: La existencia de producciones de una sola especie vegetal (monocultivos) o animal hace que la mayoría de los insumos necesarios en el proceso productivo sean importados y que los desechos producidos se descarguen al ambiente. Se estimula entonces la entrada y salida de recursos con poco o nulo reciclaje dentro del sistema.
- No hay reutilización de las aguas servidas por la falta de integración: Como consecuencia de lo expuesto en el punto anterior, los residuos líquidos y sólidos, en especial las excretas, no pueden ser usadas en actividades de fertilización o producción de energía.
- Pérdida de energía y nutrientes en el proceso: Los residuos que resultan de la explotación poseen energía, materia orgánica y nutrientes, que pueden ser utilizados y se pierden en el proceso. Estos recursos no aprovechados deben obtenerse en el mercado, lo que a su vez tiene implicaciones económicas.
- Prioridad al rendimiento financiero en el corto plazo: La preocupación por los efectos ambientales negativos de la producción ha sido generalmente olvidada o relegada a un segundo plano. Recientemente ha crecido la conciencia hacia dichos efectos o simplemente éstos han sido impuestos mediante regulaciones ambientales. En este orden de ideas, tradicionalmente lo más importante era la posibilidad de un rendimiento económico en el corto plazo.

Los planteamientos anteriormente mencionados indican que la contaminación aparece como resultado de un proceso ineficiente o incompleto que no utiliza de manera apropiada los recursos que posee o que genera. Un contaminante, desde esta perspectiva, es un recurso en el lugar equivocado [Living Water, 1996].

De esta forma, en lugar de considerar los desechos porcinos como un problema, se pueden mirar como una fuente de recursos útiles en la producción agropecuaria. La contaminación es el resultado de formas de producción inadecuadas que permiten enormes fugas en el proceso y que, por tanto, son ineficientes en el uso de los recursos y poco rentables a largo plazo. La tendencia predominante hacia la especialización de los rubros productivos dificulta la utilización de los subproductos resultantes en el proceso, por lo cual se privilegia la entrada y salida de insumos y no el reciclaje interno. En este tipo de sistemas lo más importante es el rendimiento económico a corto plazo desestimando el deterioro que se causa a los recursos naturales.

Para el caso de una explotación porcina con 100 animales de 50 Kg de peso promedio, en la Tabla N°3.1 se muestran los productos que se podrían obtener si el estiércol se utilizara adecuadamente [Polprasert, 1989], considerando que por cada 100 kg de peso vivo se produce 0,75 Kg de materia seca [ACP *et al*, 1997].

**Tabla N°3.1:** Recursos presentes en los desechos porcinos de una explotación de levante y ceba

| <b>Recurso</b>                | <b>Tasa de producción</b>           | <b>Producción diaria<br/>por 100 cerdos</b> | <b>Equivalente anual</b>        |
|-------------------------------|-------------------------------------|---|---------------------------------|
| Biogas                        | 0,69-1,02 m <sup>3</sup> / kg de MS | 25,9-38,2 m <sup>3</sup>                    | 990 a 1460 gal de diesel        |
| Nitrógeno                     | 0,045 kg/ 100 kg de peso            | 2,25 kg                                     | 1784 kg de urea                 |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | 0,031 kg/ 100 kg de peso            | 1,5 kg                                      | 1190 kg de super-fosfato triple |

**Fuente:** Chará, 1999.

Estos productos pueden ser empleados en el sistema productivo siempre que haya una adecuada integración. Tal es el caso del tipo de porcicultura que se presenta en algunas zonas del departamento de Antioquia (Colombia) en el cual los cerdos generan el abono necesario para los pastos usados en la producción lechera. De esta

forma se recuperan recursos que generan contaminación y se ponen al servicio del sistema productivo, lo cual genera también beneficios económicos [Chará, 1999].

### 3.3.1. Tasas de excreción porcinas

Parte del alimento sólido y del agua se transforma en ganancia de peso y parte en formas de energía liberada al medio. Normalmente, un cerdo en crecimiento excreta entre 50 y 60% de los sólidos fijos y entre 10 y 20% de la materia orgánica del alimento [Taiganides, 1963]. Los principales componentes de la materia sólida en las excretas son los sólidos orgánicos e inorgánicos.

Las tasas de excreción de heces y orina están relacionadas con la edad del animal, su madurez fisiológica, la cantidad y calidad del alimento ingerido, el volumen de agua consumida, el clima y otros factores menos importantes. Por tal motivo, no es posible, ni práctico, definir con precisión la cantidad de excretas por día. La Tabla N°3.2 muestra las tasas de excreción tomadas de ocho diferentes fuentes, ubicadas en Estados Unidos, Sudamérica y de las regiones tropicales de Asia, como resultado de un promedio estadístico en una gran variedad de granjas.

**Tabla N°3.2:** Tasa diaria de excreción (Kg estiércol/100 Kg PV)

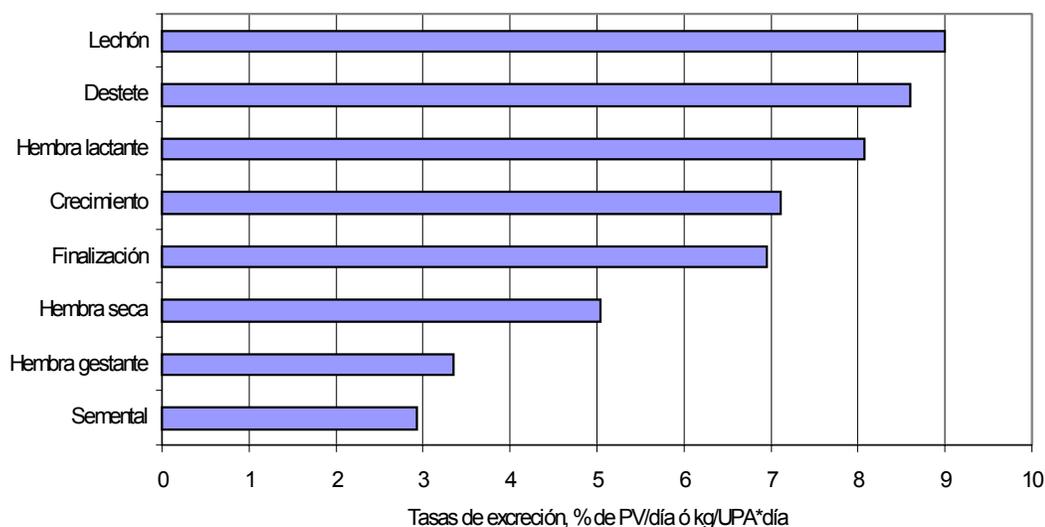
| Cerdo    | Lechón | Destete | Hembra lactante | Crecimiento | Finalización | Hembra seca | Hembra gestante | Verraco | Promedio |
|----------|--------|---------|-----------------|-------------|--------------|-------------|-----------------|---------|----------|
| Mínimo   | 6,8    | 6,6     | 6,0             | 5,9         | 5,8          | 3,3         | 2,7             | 2,1     | 5,0      |
| Promedio | 9,0    | 8,6     | 8,1             | 7,1         | 7,0          | 5,0         | 3,4             | 2,9     | 6,2      |
| Máximo   | 12,3   | 11,7    | 11              | 9,7         | 9,5          | 6,9         | 4,6             | 4,0     | 8,0      |

**Fuente:** Taiganides *et al*, 1996.

En la Figura N°3.6 se observa las tasas de excreción diaria por cada tipo de cerdo, expresado en porcentaje de peso vivo (PV) por día ó Kg de excrementos por un cerdo de 100 Kg de peso vivo ó Unidad de Producción Animal (UPA) por día. Los lechones, destetes y hembras lactantes excretan entre el 8 –9 % de su PV por día; los

cerdos en crecimiento y finalización excretan cerca del 7% de su PV, mientras que los sementales y las hembras gestantes y secas, animales que se les limita el acceso al alimento, excretan cerca del 3% de su PV por día.

Con base a las fuentes anteriormente mencionadas, la orina representa menos del 50% de la excreta. El contenido de humedad de las excretas es de 88%, por lo que el contenido de materia seca es el resto (12%). Por otra parte, la densidad de heces y orina es menor a  $1,0 \text{ g/cm}^3$  [Taiganides *et al*, 1996].



**Fuente:** Taiganides *et al*, 1996.

**Figura N°3.6:** Tasas de excreción diaria de los cerdos

En cuanto a la generación de excretas, en la Tabla N°3.3 se muestra la producción de heces y orina por tipo de cerdo, expresado en Kg/día, observándose que tanto las cerdas y el verraco excretan en mayor cantidad, mientras los otros tipos de cerdo producen menos.

**Tabla N°3.3:** Producción de heces y orina procedentes de diferentes tipos de cerdos

| Tipo de cerdo             | Heces (Kg/día) | Orina (Kg/día) | Total (Kg/día) |
|---------------------------|----------------|----------------|----------------|
| Destetados<br>(30-60días) | 0,9-1,4        | 1,6-2,0        | 2,5-3,4        |
| Ceba (60-220días)         | 3,0-3,4        | 3,5-4,0        | 6,5-7,4        |
| Cerda                     | 7,5-8,5        | 8,0-9,0        | 15,5-17,5      |
| Verraco                   | 7,0-8,0        | 8,0-8,5        | 14,0-16,5      |

**Fuente:** Taiganides *et al*, 1996.

Sin embargo, al observar la Figura N°3.7, el mayor aporte por corral lo representa el grupo de finalización; esto obedece a la mayor densidad de población, pues la cantidad de cerdas es más reducida y por cada 15 cerdas hay un verraco a nivel de explotación de producción; por lo tanto, aunque excreten en mayor cantidad al día hay menos aporte del total de animales, lo cual varía según la condición del animal y su dieta.



**Fuente:** Taiganides *et al*, 1996.

**Figura N°3.7:** Distribución porcentual de excretas en una unidad de producción porcina

### ***3.3.2. Características de los efluentes porcinos***

Las características de las deyecciones se presentan en términos de cantidades de sólidos, parámetros generales de diseño físico-químico, contenido de nutrientes primarios y secundarios, micronutrientes, metales, entre otros.

Es de importancia destacar que las relaciones entre los diferentes constituyentes de los sólidos totales cambian con la adición de agua y con el tiempo, sobre todo por tratarse de materia orgánica que se descompone una vez excretada.

La determinación de las características físico – químicas de los efluentes líquidos de granjas porcinas han permitido clasificarlos como altamente agresivos. A continuación se presentan los parámetros que se determinan para conocer la calidad del efluente que luego se compararan con la normativa ambiental vigente, en descarga a cuerpos de agua y calidad mínima para agua de regadío.

#### **3.3.2.1. Parámetros Físicos:**

La característica física más importante de los líquidos residuales de una granja porcina es el contenido y distribución de sólidos o residuos.

- **Sólidos:** Los Sólidos Totales (STT), se componen de sólidos suspendidos totales (SST) y disueltos totales (SDT). Los sólidos suspendidos totales se clasifican en sólidos suspendidos volátiles (SSV) y fijos (SSF), los sólidos disueltos totales en sólidos disueltos volátiles (SDV) y fijos (SDF).
- **Sólidos Totales (STT, mg/l):** Los sólidos que quedan después de la evaporación del agua a 103°C constituyen los sólidos totales. Este es un parámetro crítico en el diseño de sistemas de manejo, bombeo y en la caracterización del agua residual. Son la suma de los Sólidos Volátiles Totales y los Sólidos Fijos Totales.

- **Sólidos Volátiles Totales (SVT, mg/l):** Representan la materia orgánica y se expresan generalmente como un porcentaje de los STT en las excretas frescas de los cerdos. Alrededor de 50% de los SVT de las excretas porcinas es degradable por bacterias. Los SVT son un parámetro que se usa en el diseño de fórmulas para los procesos de tratamiento.
- **Sólidos Fijos Totales (SFT, mg/l):** Son las cenizas minerales que permanecen después de quemar los sólidos totales a 550°C en una mufla. Constituyen el contenido mineral que no se puede reducir biológicamente.
- **Sólidos Suspendidos Totales (SST, mg/l):** Constituyen la diferencia entre los sólidos totales (STT) de la muestra no filtrada y los sólidos de la muestra filtrada. Los sólidos suspendidos volátiles y sólidos suspendidos fijos se refieren, respectivamente, al contenido orgánico e inorgánico (mineral) de los sólidos suspendidos.
- **Sólidos Disueltos Totales (SDT, mg/l):** Se componen de moléculas orgánicas e inorgánicas e iones que se encuentran presentes en disolución verdadera en el agua. Los sólidos disueltos volátiles y sólidos disueltos fijos se refieren, respectivamente, al contenido orgánico e inorgánico (mineral) de los sólidos disueltos.
- **Sólidos Sedimentables (SS, ml/l):** Una fracción de los sólidos suspendidos la constituyen los sólidos sedimentables, que permiten estimar la cantidad de lodos que puede ser removida por sedimentación y se determinan utilizando como Imhoff.
- **Sólidos Flotantes (SFL, ml/l):** Consisten en sólidos que son más ligeros que el agua, como fibras, plásticos, objetos de madera, grasa, aceite, etc. Algunos de los lodos del fondo se transforman en sólidos flotantes durante la descomposición anaerobia, cuando las burbujas del gas se convierten en el medio de transporte de estos sólidos.

### 3.3.2.2. Parámetros Físico-químicos

Los compuestos orgánicos normalmente están formados por la combinación de carbono, hidrógeno, oxígeno y otros elementos como nitrógeno, fósforo y azufre. Estos compuestos incluyen proteínas, carbohidratos, aceites y grasas. Se han desarrollado diferentes métodos para determinar el contenido de materia orgánica en un agua residual. Actualmente los métodos comúnmente utilizados son la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y la Demanda Química de Oxígeno (DQO).

- **Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO, mg/l):** Se define como la cantidad de oxígeno requerida por los microorganismos para estabilizar la materia orgánica bajo condiciones aerobias. Para asegurar que los resultados obtenidos mediante este ensayo sean representativos, la muestra deberá ser convenientemente diluida con agua, previamente preparada, a fin de que existan nutrientes y oxígeno disponibles durante el período de ensayo. El período de incubación generalmente es de 5 días a 20°C, aún cuando pueden utilizarse otros períodos de tiempo y temperatura. La masa de DBO generada por cerdo por día es de dos a tres veces mayor que el de un ser humano del mismo peso vivo.

La oxidación bioquímica de la materia orgánica es un proceso lento, y teóricamente tarda un tiempo infinito para completarse, sin embargo, después de un período aproximado de 20 días, la oxidación se ha completado entre 95 y 98%, y en 5 días la DBO se ha ejercido en un 60 – 70%.

La cinética de la DBO se formula de acuerdo con una reacción de primer orden y puede expresarse como:

$$y = L(1 - e^{-k_c * t}) = L(1 - 10^{-k_{10} * t}) \quad (3.1)$$

Donde:

y: DBO a cualquier día y temperatura (mg/l).

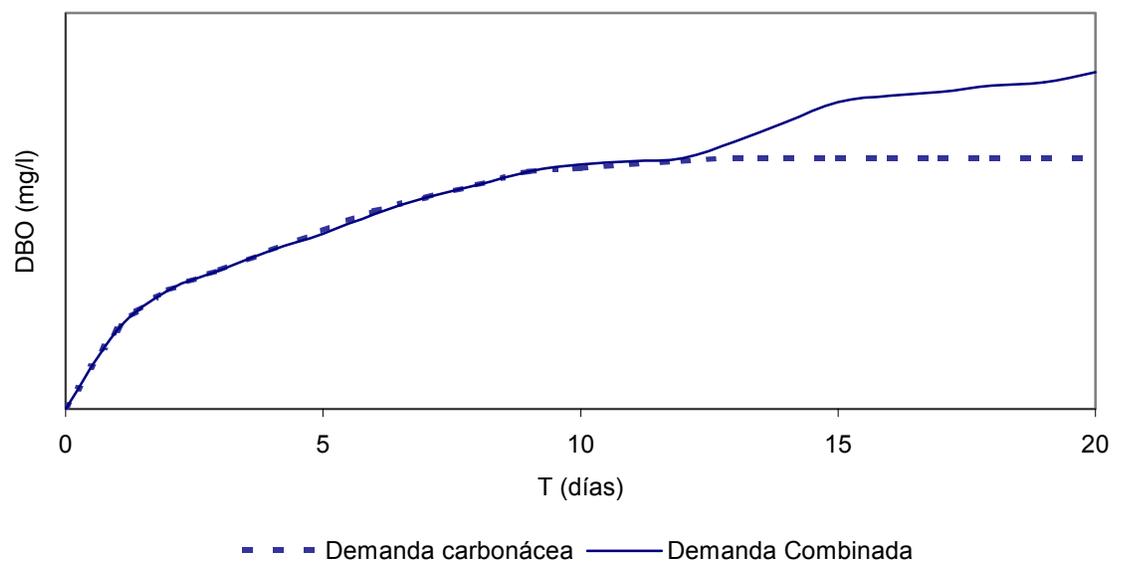
L: Demanda última carbonácea de oxígeno (mg/l).

$k_e$ : Constante de oxidación en base e ( $\text{día}^{-1}$ ).

$k_{10}$ : Constante de oxidación en base 10 ( $\text{día}^{-1}$ ).

t: Tiempo (días).

En la Figura N°3.8 se representa el consumo de oxígeno para estabilizar la materia orgánica carbonácea y el necesario para oxidar la carbonácea en combinación con la nitrogenada, esta es la ejercida por el efluente en la disposición a cuerpos de agua.



**Figura N°3.8:** Ejercicio de la DBO

En la Tabla N°3.4 se aprecia valores de la constante de oxidación carbonácea y demanda última carbonácea de oxígeno de diferentes granjas.

**Tabla N°3.4:** Demanda última carbonácea de oxígeno y constante de oxidación

| Parámetro                     | Granja de 3040 cerdos |               | Granja de 4300 cerdos |               |
|-------------------------------|-----------------------|---------------|-----------------------|---------------|
|                               | Sin inhibidor         | Con inhibidor | Sin inhibidor         | Con inhibidor |
| $k_{10}$ (día <sup>-1</sup> ) | 0,13                  | 0,05          | 0,32                  | 0,20          |
| L (mg/l)                      | 5100                  | 8000          | 1600                  | 1500          |

**Fuente:** Adaptado de Mezones y Palacios, 1985.

- **Demanda Química de Oxígeno (DQO, mg/l):** Mide la cantidad total de oxígeno necesario para oxidar tanto la materia degradable biológicamente como el resto de la materia orgánica que puede ser oxidada químicamente: la fibra, la lignina, etc. En aguas residuales de granjas porcinas la DQO se aproxima a las concentraciones de STT en las excretas frescas de cerdo [Taiganides *et al*, 1996].
- **Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK, mg N/l):** Representa el contenido total de nitrógeno según el método de digestión Kjeldahl. La proteína cruda se calcula multiplicando el NTK por el factor 6.25 como se hace en las formulaciones alimenticias. Las concentraciones de NTK en las aguas residuales porcinas son altas por el alto contenido proteico del alimento. El Nitrógeno Kjeldahl es el total del nitrógeno orgánico y del amoniacal.
- **Nitrógeno Amoniacal Total (TAN, mg N/l):** Representa la proporción de nitrógeno que está presente en forma de amoníaco (NH<sub>3</sub>) o como ion amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), dependiendo del pH de la solución. En las excretas frescas o incluso en las almacenadas, la mayoría del nitrógeno está en forma de amoníaco, el cual le confiere un olor desagradable. La muerte y descomposición de las proteínas animales y vegetales por las bacterias produce amoníaco. La edad del agua residual viene indicada por la cantidad relativa de amoníaco presente [Taiganides *et al*, 1996].

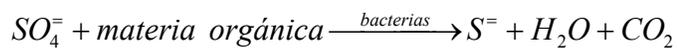
- **Nitrógeno Orgánico (TON, mg N/l):** Las principales formas de nitrógeno son el orgánico y el amoniacal. Esta parte del nitrógeno no está disponible directamente para las plantas, pero lo hace a través de la acción de las bacterias en condiciones aerobias del suelo. El nitrógeno orgánico se determina por el método Kjeldahl.
- **Nitrito (mg N/l):** El nitrógeno del nitrito tiene relativamente poca importancia en los estudios sobre aguas residuales o contaminación de aguas, ya que es inestable y se oxida fácilmente a la forma de nitrato. Es un indicador de la contaminación pasada en el proceso de estabilización y raramente excede de 1 mg/l. Se determina por colorimetría.
- **Nitrato (mg N/l):** El nitrógeno del nitrato es la forma más oxidada del nitrógeno que se encuentra en las aguas residuales. El predominio del nitrógeno del nitrato indica que el agua residual se ha estabilizado con respecto a la demanda de oxígeno. Sin embargo, los nitratos pueden ser usados por las algas y otras plantas acuáticas para formar proteínas vegetales que, a su vez, pueden ser utilizadas por animales para formar proteínas animales. Los nitratos pueden variar en su concentración de 0 a 20 mg/l como N, en efluentes de aguas residuales con un intervalo típico de 15 a 20 mg/l como N. La concentración del nitrato es generalmente determinada por métodos colorimétricos.
- **Fósforo Total (TPP, mg/l):** El fósforo, así como el nitrógeno, es esencial para el crecimiento de las algas y otros organismos biológicos. Las formas frecuentes en que se encuentra el fósforo en soluciones acuosas son ortofosfato, polifosfato, y fosfato orgánico. Los ortofosfatos, por ejemplo,  $\text{PO}_4^{-3}$ ,  $\text{HPO}_4^{-2}$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  y  $\text{H}_3\text{PO}_4$ , se hallan disponibles para el metabolismo biológico sin precisar posterior ruptura. Los polifosfatos incluyen las moléculas con dos o más átomos de fósforo, átomos de oxígeno, y, en algunos casos, átomos de hidrógeno combinados en una molécula compleja. Los polifosfatos sufren la hidrólisis en soluciones acuosas y vuelven a sus

formas de ortofosfato; sin embargo, ésta hidrólisis es generalmente bastante lenta [Metcalf & Eddy, 1985].

- **Potasio Total (TKK, mg/l):** Normalmente el contenido de potasio se mide con pruebas para potasa. El potasio es un componente crítico en los fertilizantes, pero no en el tratamiento de aguas residuales. Los fertilizantes se gradúan con base a su contenido de N, P y K.

- **Cloruros (mg/l):** Los cloruros que se encuentran en el agua natural proceden de la disolución de suelos y rocas que los contengan y que están en contacto con el agua. Otra fuente de cloruros es la descarga de aguas residuales domésticas, agrícolas e industriales a aguas superficiales. Las heces humanas, por ejemplo, suponen unos 6 g de cloruros por persona - día. En lugares donde la dureza del agua sea elevada, los compuestos que reducen la dureza del agua también son una importante fuente de aportación de cloruros. Puesto que los métodos convencionales de tratamiento de las aguas no contemplan la eliminación de cloruros en cantidades significativas, concentraciones de cloruros superiores a las normales pueden constituir indicadores de que la masa de agua receptora está siendo utilizada para el vertido de aguas residuales [Metcalf & Eddy, 1985].

- **Sulfato (mg/l):** El ion sulfato se presenta naturalmente en la mayoría de los suministros de agua y también en el agua residual. El azufre es requerido en la síntesis de proteínas y es liberado en su degradación. Los sulfatos son reducidos químicamente a sulfuros y a sulfuros de hidrógeno ( $H_2S$ ) por las bacterias en condiciones anaerobias, como se muestra en las siguientes ecuaciones:



El  $H_2S$  puede ser oxidado biológicamente a ácido sulfúrico, el cual es corrosivo para las tuberías (efecto corona).

- **Alcalinidad ( $mg\ CaCO_3/l$ ):** La alcalinidad de un agua residual representa la presencia de hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos de elementos como el calcio, magnesio, sodio, potasio o amoníaco. De entre todos ellos, los más comunes son el bicarbonato de calcio y el bicarbonato de magnesio. La alcalinidad ayuda a regular los cambios del pH producidos por la adición de ácidos.

- **pH:** Es una medida estándar de la neutralidad de los líquidos. El estado básico o ácido cambia significativamente las reacciones químicas, por lo tanto, es un factor crítico en sistemas bioquímicos. El pH de los residuales porcinos se encuentra entre 6 y 8, pero para propósitos de diseño, el pH promedio es de 7,5.

- **Temperatura ( $T, ^\circ C$ ):** La temperatura del agua es crítica porque afecta la vida de los organismos. Las reacciones microbiológicas se duplican al incrementar en  $10^\circ C$  la temperatura del agua. La tasa de disolución del oxígeno disminuye al aumentar la temperatura. El oxígeno disuelto en el agua es más elevado en las aguas frías que en las calientes. Los peces y la vida acuática requieren elevadas cantidades de Oxígeno Disuelto (OD) para sobrevivir y por ello están directamente afectados por los cambios en la temperatura. La temperatura no es un parámetro crítico para las excretas porcinas porque generalmente no alcanzan valores diferentes a la temperatura del agua circundante.

### 3.3.2.3. Parámetros Biológicos

El tracto intestinal del ser humano contiene innumerables bacterias en forma de bastoncillo, conocidas como organismos coliformes. Cada persona evacua de 100.000 a 400.000 millones de organismos coliformes por día, además de otras clases de bacterias. Los organismos coliformes no son dañinos al hombre y, de hecho, son

útiles para destruir la materia orgánica en los procesos biológicos de tratamiento de las aguas residuales.

- **Coliformes Totales (CFT, NMP/100ml):** Los organismos coliformes son los más numerosos y fáciles de detectar, y se emplean como indicador de la existencia de organismos productores de enfermedad. Son bacterias bacilares gram negativas que fermentan la lactosa con producción de gas en 48h a  $35 \pm 0,5$  °C. Incluyen cuatro géneros: *Escherichia*, *Klebsiella*, *Citrobacter* y *Enterobacter*. El género *Escherichia* es el más representativo de contaminación fecal. Se pueden conseguir en aire, agua y hasta en los suelos, sin embargo no son patógenos. El hecho de que los *Aerobacter* y ciertos *Escherichia* pueden crecer en el suelo, no permite afirmar siempre que su presencia la cause la contaminación fecal. Las unidades de medida son el número más probable (NMP) de colonias por 100 ml de muestra y unidades formadoras de colonias (ufc) por 100ml.

- **Coliformes Fecales (CFT, NMP/100ml):** Los coliformes fecales se originan en animales de sangre caliente como los cerdos, y representan contaminación fecal. Estos se reproducen en el tracto intestinal y son excretados con las heces. La presencia de *Escherichia Coli* puede ser indicador de que el agua ha sido contaminada por los cerdos u otros animales de sangre caliente.

En la Tabla N°3.5 se muestra un resumen de los parámetros físico – químicos de diferentes granjas porcinas, observándose diferencias entre ellos, esto se le atribuye principalmente al manejo de los cerdos en cuanto alimentación y lavado. Es evidente los elevados valores de  $DBO_{5,20}$ , DQO, sólidos, nitrógeno, fósforo, entre otros; los cuales al compararlos más adelante con la normativa ambiental, justifican la necesidad de tratamiento.

**Tabla N°3.5:** Comparación de las características de efluentes líquidos generados en granjas porcinas de Venezuela

| PARÁMETRO                                 | GRANJA A<br>(3040 CERDOS) | GRANJA B<br>(5335 CERDOS) | GRANJA C<br>(4300 CERDOS) |
|---|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| DBO <sub>5,20</sub> Total (mg/l)          | 5103                      | 2894                      | 4970                      |
| DQO (mg/l)                                | 24109                     | 10717                     | 13050                     |
| Sólidos (mg/l)                            |                           |                           |                           |
| Total                                     | 31108                     | 22772                     | 14500                     |
| Fijo                                      | 6635                      | 7811                      | 3500                      |
| Volátil                                   | 24473                     | 14961                     | 11000                     |
| Disuelto total                            | 6546                      | 7818                      | 3920                      |
| Fijo                                      | 2471                      | 4487                      | 1930                      |
| Volátil                                   | 4075                      | 3331                      | 1990                      |
| Suspendido total                          | 24562                     | 14954                     | 10580                     |
| Fijo                                      | 4164                      | 3324                      | 1570                      |
| Volátil                                   | 20398                     | 11630                     | 9010                      |
| Sólidos sedimentables (ml/l)              | 456                       | 216                       | 230                       |
| Nitrógeno NTK (mg N/l)                    | 1630                      | 1209                      | 850                       |
| Amoniacal                                 | 598                       | 729                       | 410                       |
| Orgánico                                  | 1032                      | 480                       | 440                       |
| Fósforo total (mg/l)                      | -                         | 270                       | 90                        |
| Cloruros (mg/l)                           | 67                        | -                         | 210                       |
| Aporte volumétrico unitario (l/cerdo.día) | 6,4                       | 9,9                       | 10,8                      |

**Fuente:** Mezones y Palacios, 1985.

### 3.4. *NORMATIVA AMBIENTAL*

A nivel mundial existen regulaciones para las descargas a cuerpos de agua y en Venezuela existen normas que se deben cumplir al respecto. Estas se presentan a continuación:

### 3.4.1. Normativa para vertidos a cuerpos de agua

En cuanto a los rangos y límites máximos de calidad de vertidos a cuerpos de agua, se encuentra el Artículo 10 del Decreto 883. A continuación se presenta un extracto de dicho artículo.

“Artículo 10.- A los efectos de este Decreto se establecen los siguientes rangos y límites máximos de calidad de vertidos líquidos que sean o vayan a ser descargados, en forma directa o indirecta, a ríos, estuarios, lagos y embalses.

| <b>Parámetros Físicos-Químicos</b>                   | <b>Límites máximos o rangos</b> |
|--|---------------------------------|
| Aceites y grasa vegetales y animales                 | 20 mg/l                         |
| Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO <sub>5,20</sub> ) | 60 mg/l                         |
| Demanda Química de Oxígeno (DQO)                     | 350 mg/l                        |
| Fósforo total (expresado como fósforo)               | 10 mg/l                         |
| Nitrógeno total (expresado como nitrógeno)           | 40 mg/l                         |
| Nitritos + Nitratos (expresado como nitrógeno)       | 10 mg/l                         |
| pH   | 6-9                             |
| Sólidos flotantes                                    | Ausentes                        |
| Sólidos suspendidos                                  | 80 mg/l                         |
| Sólidos sedimentables                                | 1,0 ml/l                        |

**Parámetros Biológicos:** Número más probable de organismos coliformes totales no mayor de 1.000 por cada 100 ml, en el 90% de una serie de muestras consecutivas y en ningún caso será superior a 5.000 por cada 100 ml”.

### 3.4.2. Normativa para aguas de usos agropecuarios

En cuanto a aguas destinadas a usos agropecuarios, hay dos tipos según el artículo N°3, del Decreto 883: las Sub Tipo 2A (aguas para riego de vegetales destinados al consumo humano) y las del Sub Tipo 2B (aguas para el riego de cualquier otro tipo

de cultivo y para uso pecuario). Los niveles de calidad exigibles según el uso a que se destinen son los siguientes, como lo expresa el artículo N°4 en dicho decreto:

- Las aguas del Sub Tipo 2A son aquellas cuyas características corresponden con los límites y rangos siguientes:

| <b>Parámetro</b>   | <b>Límite o rango máximo</b>                     |
|--------------------|--|
| Coliformes totales | Promedio mensual menor a 1000 NMP por cada 100ml |
| Coliformes fecales | Menor a 100 NMP por cada 100ml                   |

- Las aguas del Sub Tipo 2B son aquellas cuyas características corresponden con los límites y rangos siguientes:

| <b>Parámetro</b>   | <b>Límite o rango máximo</b>                     |
|--------------------|--|
| Coliformes totales | Promedio mensual menor a 5000 NMP por cada 100ml |
| Coliformes fecales | Menor a 1000 NMP por cada 100ml                  |

Las aguas de los Sub Tipo 2A y 2B no deberán exceder, además, los siguientes límites:

| <b>Elementos o compuestos</b> | <b>Límites</b> |
|-------------------------------|----------------|
| Sólidos disueltos totales     | 3000 mg/l      |
| Sólidos flotantes             | Ausentes       |

### ***3.5. SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES***

Las aguas residuales son conducidas a cuerpos receptores o a la tierra. La compleja pregunta acerca de qué contaminantes de las aguas residuales deben ser eliminados para proteger el entorno, y en qué cantidad, precisa de una contestación específica en cada caso concreto. Ello requiere el análisis de las condiciones y necesidades locales, junto con la aplicación del conocimiento científico, de la

experiencia previa de ingeniería y de las normas reguladoras de la calidad del agua existentes.

Con el fortalecimiento que se está dando a las leyes sobre vertimiento de aguas residuales es necesario que todas las actividades susceptibles de degradar el ambiente establezcan sistemas de descontaminación eficientes. Desafortunadamente en el país se ha avanzado relativamente poco sobre sistemas de descontaminación de aguas residuales porcinas. Sobre este particular, como en muchos casos, se han copiado las soluciones desarrolladas en otros países o para otro tipo de efluentes.

Entre las características de estos sistemas convencionales de descontaminación tenemos:

- Han sido desarrollados en medios no tropicales.
- La tecnología ha partido de países industrializados que han alcanzado un desarrollo económico avanzado.
- Poseen buena eficiencia en la descontaminación pero generalmente no aprovechan los residuos generados.

Existen muchos tipos de tratamiento de aguas residuales que generalmente se utilizan de manera combinada. Los tratamientos pueden ser físicos, como la filtración, la sedimentación y la evaporación; químicos, entre los que se encuentran la neutralización y la precipitación, y los biológicos que se dividen a su vez en aerobios (dependen de organismos que requieren oxígeno para su metabolismo) y anaerobios (los organismos que no requieren oxígeno); al primer grupo pertenecen las lagunas de aireadas y los lodos activados; y al segundo, los reactores UASB y los biodigestores.

Los diferentes sistemas de tratamiento de aguas residuales de mayor empleo se presentan en la Tabla N°3.6. De estos sistemas, los más usados en zonas templadas son los químicos, los físicos y los aerobios. La mayoría de estos sistemas se

caracterizan por su elevado costo en instalación y/o mantenimiento, requieren diferentes insumos químicos, consumen altas cantidades de energía y, al igual que los sistemas de producción especializados, disminuyen la contaminación de las aguas pero desaprovechan los subproductos generados en el proceso o deben incurrir en altos costos para disponerlos adecuadamente.

**Tabla N°3.6:** Clasificación de los Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales

| TRATAMIENTOS QUÍMICOS   | TRATAMIENTOS FÍSICOS   | TRATAMIENTOS BIOLÓGICOS |                               |
|-------------------------|--|-------------------------|-------------------------------|
|                         |  | Aerobios                | Anaerobios                    |
| Neutralización          | Separación de Sólidos y Líquidos   | Lodos activados         | Reactores de Flujo Ascendente |
| Precipitación           | Tamizado   | Lagunas aerobias        | Lagunas anaerobias            |
| Intercambio de Iones    | Sedimentación  | Lagunas aireadas        | Digestores convencionales     |
| Oxidación/Reducción     | Flotación  | Lecho biopercolador     | Lecho anaerobio               |
| Solidificación/Fijación | Filtración   |                         |                               |
| Cloración               | Centrifugación   |                         |                               |
|                         | Separación por membranas:<br>diálisis, ósmosis<br>evaporación, extracción<br>destilación y expulsión con vapor |                         |                               |

**Fuente:** Adaptado de Conchon, 1996.

El hecho de que la mayoría de esos sistemas hayan sido desarrollados en zonas que presentan las cuatro estaciones hace que no se haya valorado su potencial productivo y que se dependa de procesos que sean poco vulnerables a los cambios de temperatura. Por tanto, la instalación de estos sistemas en países poco desarrollados no sólo resulta inadecuado sino impracticable en el corto y mediano plazo por sus altos costos.

De los sistemas enunciados en la Tabla N°3.6, los más aplicados en el trópico son los biológicos, que dependen de procesos realizados por microorganismos sobre los desechos. Entre los sistemas biológicos, los tratamientos aerobios han sido los más empleados hasta el momento, principalmente los lodos activados. Sin embargo, éstos presentan ciertas características que los hacen dependientes de insumos y energía para su funcionamiento.

Los sistemas de tratamiento anaerobios generan gas metano que puede ser empleado como combustible; además no consumen energía necesaria para la aireación, recirculación y disposición de lodos. Aunque el sistema anaerobio requiere aún algunos ajustes, su promoción en los países tropicales es estratégica pues son de menor costo y permiten recuperar hasta un 90% de la energía de los desechos mediante el biogas. No obstante, debido a que el tratamiento anaerobio no es total, es necesario completarlo mediante otros medios, lo cual puede realizarse con una integración a otros sistemas naturales.

En la Tabla N°3.7 se presenta una comparación entre los sistemas aerobios y anaerobios, y tal como se deduce, los sistemas anaerobios presentan notables ventajas frente a los aerobios en cuanto a consumo de insumos y generación de energía, lo cual tiene implicaciones económicas importantes.

Actualmente, la tendencia en los sistemas de descontaminación con una visión productiva tiene como principal característica el que tratan de extraer al máximo la energía, materia orgánica y nutrientes presentes en las aguas residuales mediante diferentes procesos físicos y biológicos. Al extraer estos recursos se logra que en cada paso el agua vaya recuperando paulatinamente su calidad. Uno de los pasos finales es el uso de las aguas parcialmente procesadas para el abonamiento de cultivos y/o praderas.

**Tabla N°3.7:** Comparación entre sistemas aerobios y anaerobios de tratamiento de aguas residuales

| PARÁMETRO                 | AEROBIOS  | ANAEROBIOS  |
|---------------------------|---|---|
| Reacción Química          | $C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O$   | $C_6H_{12}O_6 \rightarrow 3CO_2 + 3CH_4$  |
| Destino del carbono       | 50% se convierte en $CO_2$ .<br>40-50% se incorpora a la biomasa microbiana.                            | 95% se convierte en biogas.<br>5% se convierte en biomasa bacterial.                            |
| Destino de la energía     | 60% se almacena en nueva biomasa.<br>40% se pierde como calor.  | 90% retenida en metano ( $CH_4$ ).<br>3-5% se pierde como calor.<br>5-7% almacenado en biomasa. |
| Consumo de energía        | Alto. Se requiere en aireación, nutrientes, recirculación de lodos, tratamiento y disposición de lodos. | Nulo. En cambio se produce 0,5 $m^3$ de biogas por Kg de DBO removida.                          |
| Adición de nutrientes     | Requiere de una alta aplicación de nutrientes, en especial nitrógeno.                                   | Mínima necesidad de nutrientes.   |
| Tiempo de Arranque        | Corto.  | Largo.  |
| Avance de tecnología      | Tecnología establecida.   | Recientemente establecida, requiere ajustes.  |
| Tolerancia de temperatura | Amplio rango de temperaturas.   | Sólo temperaturas mayores de 15°C.  |

**Fuente:** Conchon y Gijzen, 1996.

### 3.5.1. *Sistemas convencionales de tratamiento de aguas residuales*

Los métodos de tratamiento en los que predomina la aplicación de fuerzas físicas son conocidos como operaciones unitarias. Aquellos en que la eliminación de los contaminantes se consiguen mediante reacciones químicas o biológicas se conocen como procesos unitarios. En la actualidad, las operaciones y procesos unitarios se agrupan para constituir lo que se conoce como tratamientos preliminares, primario, secundario y terciario (o avanzado).

Los tratamientos preliminares tienen como objetivo principal proteger las instalaciones y su funcionamiento. Las unidades de desbaste conforman los

tratamientos preliminares, las cuales tienen como finalidad remover el material suspendido de gran tamaño.

En los tratamientos primarios se remueven partículas en suspensión que pueden ser sedimentables por sí mismos o mediante procesos de coagulación-floculación y materias flotantes (sólidos o líquidos), que no fueron removidas por el sistema preliminar, los cuales se quieren separar del agua residual para disminuir en cierto grado su carácter ofensivo y reducir la DBO que tienen estas partículas. Entre los tratamientos primarios más empleados se encuentran los desarenadores y los sedimentadores.

Los tratamientos secundarios son, básicamente, procesos biológicos donde la materia orgánica putrescible es descompuesta con la ayuda de biomasa en un medio aerobio o anaerobio controlado en compuestos estables de composición más sencilla, al límite de transformar muchos de los complejos orgánicos normalmente presentes en las aguas residuales, en dióxido de carbono, agua y compuestos simples nitrogenados ( $\text{NH}_3$  y  $\text{NO}_x$ ). Estos tratamientos secundarios, en general, son capaces de remover de un 80-90% en términos de DBO [Rivas, 1978]. A continuación se presenta la descripción de los tratamientos secundarios más empleados [Metcalf & Eddy, 1985]:

#### **a) Reactor de Flujo Ascendente (UASB)**

El reactor UASB es un sistema de tratamiento de aguas residuales compacto en donde el flujo se da en sentido ascendente, con un sistema de alimentación localizado en el fondo y un separador gas-sólido-líquido en la parte superior. El afluente se distribuye uniformemente en el fondo del reactor y en flujo ascendente pasa a través de un manto de lodos anaerobio (granular o floculento), que constituye la zona de digestión, en la cual, los sólidos suspendidos son atrapados y la materia

orgánica biodegradable es digerida por microorganismos anaerobios que tienen el mayor contacto con el sustrato orgánico en esta zona.

### **b) Lodos Activados**

En el proceso de lodos activados se estabiliza la carga biológica del efluente haciendo uso de un reactor bajo condiciones aerobias. El ambiente aerobio se logra mediante el uso de aireación por medio de difusores o sistemas mecánicos. Una vez que el agua residual ha sido tratada en el reactor, la masa biológica resultante se separa del líquido en un tanque de sedimentación y parte de los sólidos biológicos sedimentados son retornados al reactor; la masa sobrante es eliminada o purgada puesto que de no ser así, la masa de microorganismos continuaría aumentando hasta que el sistema no pudiera dar más cabida. El nivel al cual se debe mantener la masa biológica depende de la eficiencia deseada del tratamiento y de otras consideraciones referentes a la cinética del crecimiento bacteriano.

### **c) Lechos percoladores**

En este sistema clásico convencional el afluente es pasado a través de la unidad de tratamiento propiamente dicha, el lecho, denominado lecho percolador o de goteo. Este es, esencialmente, una caja que encierra un material de contacto, generalmente piedra picada de determinado tamaño, que al recibir el líquido residual en forma más o menos permanente se va formando una capa biológica, responsable de las transformaciones bioquímicas que desdoblan la materia orgánica biodegradable.

### **d) Lagunas de estabilización**

Las lagunas de estabilización son el método más simple de tratamiento de aguas residuales que existe. Están constituidas por excavaciones poco profundas

cercadas por taludes de tierra. Generalmente tienen forma rectangular o cuadrada. El tratamiento a través de lagunas tiene tres objetivos: remover de las aguas residuales la materia orgánica, eliminar los microorganismos patógenos y reutilizar su efluente con otras finalidades, como la agricultura.

Las lagunas de estabilización se pueden clasificar en base al comportamiento biológico que en ellas opera en: lagunas aireadas las cuales utiliza aireación por medios mecánicos para proporcionar oxígeno a las bacterias, lagunas anaerobias en toda su profundidad excepto en una capa extremadamente delgada en la superficie, al contrario de las lagunas aerobias que presentan oxígeno disuelto, indicando la presencia en todo el cuerpo de agua de bacterias aerobias y las lagunas facultativas en las cuales se efectúa la estabilización mediante una combinación de bacterias facultativas, anaerobias y aerobias.

Por otra parte, en el tratamiento terciario se utilizan combinaciones adicionales de los procesos y operaciones unitarias para eliminar otros componentes tales como el nitrógeno y el fósforo, que no son eliminados por el tratamiento secundario.

### ***3.5.2. Sistemas integrados de tratamiento de aguas***

Otros esquemas de tratamiento de los efluentes de granjas consisten en sistemas naturales. Estos sistemas hídricos poseen mecanismos mediante los cuales pueden realizar una purificación de los nutrientes, los sólidos y la materia orgánica aportados por procesos naturales o por actividades humanas de pequeña escala a los cuerpos de agua [Chará, 1997].

Los sistemas naturales de tratamiento de aguas se basan en algunas de las características para llevar a cabo procesos de descontaminación de aguas residuales. Pueden incluir microorganismos (bacterias, algas, hongos, protozoos), plantas y animales superiores que establecen complejas interrelaciones mediante las cuales se

forman verdaderas cadenas tróficas que dan como resultado que los desechos se desdoblán y asimilan en biomasa vegetal y animal que puede ser utilizada en actividades productivas, cumpliéndose el principio de que no existan desechos, pues lo que le sobra a un organismo sirve como alimento para otro [Living Water, 1996].

Como se mencionó anteriormente, estos sistemas pueden servir de complemento a los procesos anaerobios para formar sistemas integrados mediante los cuales se tratan los desechos de una manera productiva al generar biogas, abonos, forrajes y alimentos.

Dentro de un sistema productivo agropecuario la inclusión de los elementos expuestos y de otros concernientes al reciclaje de residuos sólidos mediante compostaje o producción de lombrices permiten que se utilicen todos los “desechos” generados y se empiecen a cerrar los ciclos para evitar las fugas (por vertimiento de los residuos) y la compra de insumos como abono, forraje o energía.

A nivel de integración agropecuaria los mejores ejemplos se presentan en el sureste asiático en países como China, Vietnam, Tailandia y la India. En los sistemas allí trabajados se da mucho valor a los desechos orgánicos para estimular la producción agrícola y piscícola.

En Colombia, la Fundación CIPAV ha desarrollado un sistema para el tratamiento de aguas residuales provenientes de explotaciones agropecuarias. Este sistema ha sido inspirado en buena parte en los sistemas asiáticos e incluye principalmente los siguientes elementos: biodigestores, canales de plantas acuáticas, cultivos agrícolas asociados y policultivos de peces, tal como se observa en la Figura N°3.9.

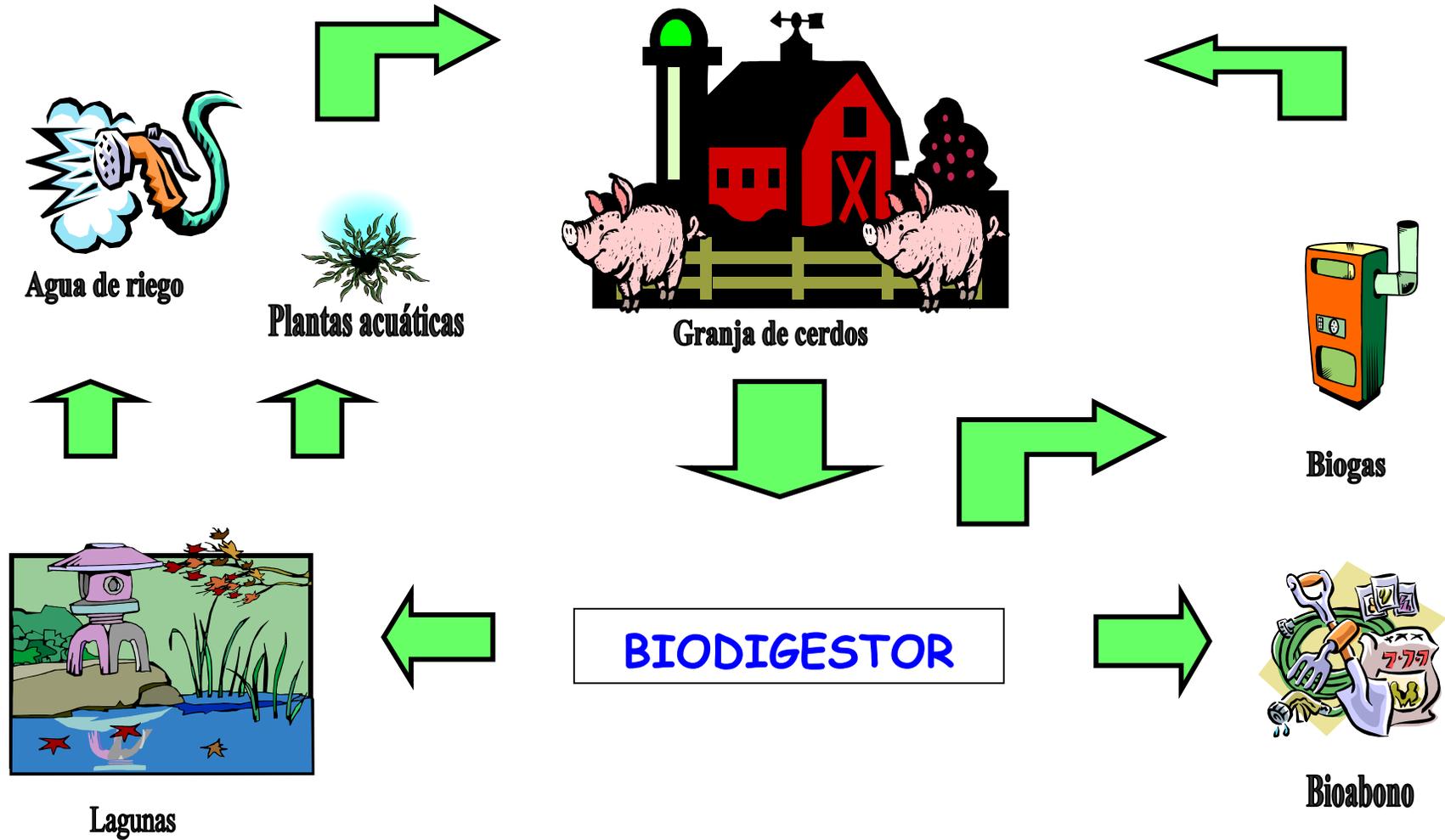


Figura N°3.9: Representación de un Sistema Integrado

### 3.5.2.1. Biodigestores

Los biodigestores forman parte de los sistemas anaerobios. En ellos los residuos son sometidos a una fermentación anaerobia y producto de la misma se obtiene biogas que posee aproximadamente 66% de metano y puede ser empleado como combustible para cocción de alimentos, calefacción de instalaciones y funcionamiento de motores y calderas.

El tiempo de retención en los biodigestores varía de acuerdo a la temperatura, se tiene que para una zona caliente (mas de 24°C) el tiempo de retención es de 22 a 25 días, en una zona intermedia (entre 14 y 24°C) de 25 a 30 días de retención y en una zona fría (entre 8 y 14°C) de 30 a 40 días de retención.

Por otro lado, el efluente resultante del proceso de digestión no pierde sus propiedades como fertilizante, pues los nutrientes no disminuyen su disponibilidad. Por esta razón, puede ser empleado como abono en cultivos o pasturas o si no existe el área para irrigar, se debe tratar mediante el cultivo de plantas acuáticas.

Los biodigestores incluidos en los sistemas de descontaminación productiva tipo CIPAV, tienen como principales ventajas su bajo costo, su facilidad de instalación, su fácil manejo y su mínimo mantenimiento.

El tamaño de los biodigestores puede ajustarse de acuerdo a la cantidad de aguas a tratar. En el paso a través de los biodigestores la contaminación se reduce hasta en un 80% en las condiciones colombianas [Pedraza y Chará, 1997].

De forma general, el biogas se ha definido como la mezcla de gases cuya composición varía de acuerdo a los detalles de su producción. La composición del biogas procedente de la digestión anaerobia de los excrementos de animales es la siguiente: 50-70 % CH<sub>4</sub>, 30-50 % CO<sub>2</sub>, 1 % H<sub>2</sub>S y 2 % H<sub>2</sub>.

Entre sus propiedades físicas más notorias se encuentra su capacidad de quemarse casi sin olores, con llama azul y un calor de combustión equivalente a  $21,5 \text{ MJ/m}^3$  ( $573 \text{ BTU/ft}^3$  o  $5135 \text{ kcal/m}^3$ ). Un metro cúbico de biogas totalmente combustionado es suficiente para generar  $1,25 \text{ KWh}$  de electricidad, generar 6 horas de luz equivalente a un bombillo de 60 Watt, poner a funcionar un refrigerador de  $1\text{m}^3$  de capacidad durante una hora, hacer funcionar una incubadora de  $1\text{m}^3$  de capacidad 30 minutos o hacer funcionar un motor de 1 HP durante 2 horas.

La presión a la que se encuentra el biogas almacenado define la distancia a la que se puede transportar a través de tuberías. Se ha calculado que a la presión de  $0,8 \text{ KPa}$  puede transportarse  $1\text{m}^3$  de biogas por hora en una tubería de  $1/2''$  a una distancia de 20 m, así como en tuberías de  $3/4''$  a 150 m de distancia. Para un diámetro de  $1''$  podrá transportarse a 500 m [Hesse, 1983].

En la práctica la purificación del biogas consiste en la remoción del dióxido de carbono o el sulfuro de hidrógeno o ambos. El dióxido de carbono es eliminado para aumentar el valor como combustible del biogas. El sulfuro de hidrógeno se elimina para disminuir el efecto de corrosión sobre los metales que están en contacto con el biogas.

Para las comunidades rurales es más práctico no ocuparse de la remoción del dióxido de carbono. En general los campesinos prefieren un gas menos eficiente que tener tiempo ocupado en el control del mismo, por lo que en las pequeñas granjas esta labor se considera innecesaria. Para grandes plantas de biogas y otras específicas donde los aspectos técnicos son menos onerosos, existen justificaciones económicas para la purificación.

El método químico más simple y eficiente de remoción del dióxido de carbono es su absorción en agua de cal. Este método necesita mucha atención por

cuanto el agua de cal se agota y necesita recambiarse frecuentemente, lo que trae como consecuencia su preparación frecuente si no se obtiene comercialmente.

Otra alternativa, es utilizar otro residual fuertemente alcalino como medio de absorción de estos gases como son los efluentes de cultivos de microalgas. El líquido efluente del digestor es vertido directamente en un tanque de gran tamaño para producir el alga spirulina.

El dióxido de carbono es bastante soluble incluso en agua neutral (878 ml/l a 20°C) bajo presión atmosférica, así que el lavado con agua ordinaria es quizás el método mas sencillo de eliminación de impurezas.

El CO<sub>2</sub> es soluble en agua mientras que el metano no lo es. A alta presión, la solubilidad del CO<sub>2</sub> aumenta proporcionalmente permitiendo que la concentración de metano en el biogas se incremente [Lau Wong, 1986].

### **3.5.2.2. Canales de Plantas Acuáticas**

Los canales de plantas acuáticas son un paso complementario en el tratamiento de las aguas residuales que se da en los biodigestores. En ellos operan factores físicos (filtración, sedimentación y adsorción) y biológicos (degradación y absorción). Las plantas actúan creando un ambiente apropiado para que las bacterias y otros microorganismos actúen sobre los desechos degradando la materia orgánica en elementos asimilables por las plantas [Polprasert, 1989].

El tamaño de los canales depende de la cantidad de aguas residuales a tratar y su forma y distribución pueden adaptarse a las condiciones topográficas de la explotación. El tiempo de retención en los canales, al igual que en los biodigestores varía de acuerdo a la temperatura. Se estima que el tiempo de retención para los canales debe ser de 10 días en clima cálido, 15 días en clima medio y 20 días en clima frío, aunque algunos factores pueden modificar este parámetro general.

En los canales, la reducción respecto del residuo inicial puede llegar hasta un 95 a 97%, a la vez que se obtiene una biomasa importante de plantas acuáticas que puede usarse como abono o alimento animal [CIPAV, 1998].

Al comienzo de los canales la planta más apropiada a sembrar es el jacinto de agua que por los sedimentos que capta en sus raíces y los nutrientes que absorbe, es un buen abono. En los canales finales, cuando se ha logrado un buen nivel de descontaminación, se puede emplear *Lemna minor* la cual absorbe bien el nitrógeno y alcanza niveles de proteína de hasta un 38% [Chará *et al*, 1997]. Este contenido proteico, junto con su alta palatabilidad y su facilidad de suministro la hacen ideal para alimentación de cerdos, aves o ganado.

Las plantas acuáticas tienen la finalidad de reemplazar la proteína en la dieta de los animales monogástricos, y al mismo tiempo contribuir a la descontaminación de efluentes procedentes de explotaciones agropecuarias. Las especies más utilizadas para este propósito son: *Lemna minor* y la *Azolla-Anabaena*, cuyos aportes se muestran en la Tabla N°3.8.

**Tabla N°3.8:** Composición de los nutrientes de la *Lemna minor* y la *Azolla-Anabaena*

| Componente     | <i>Lemna minor</i> (%MS) | <i>Azolla-Anabaena</i> (%MS) |
|----------------|--------------------------|------------------------------|
| Proteína cruda | 38,7                     | 25,0                         |
| Nitrógeno (N)  | 5,9                      | 2,0-5,3                      |
| Fósforo (P)    | 0,6                      | 0,2-1,6                      |

**Fuente:** Becerra *et al*, sf.

- ***Lemna minor*** [Crites, 2000]:

Conocida como lentejas de agua, son plantas pequeñas de agua dulce con hojas que tienen 1 a 3 mm de ancho y raíces que tienen menos de 10 mm de largo. Las lentejas de agua pueden cubrir la superficie de la laguna en cuatro días.

Las plantas no transfieren oxígeno al agua. Éstas son muy sensibles a la deriva por el viento y, por consiguiente, necesitan tabiques o barreras para mantenerse en su lugar.

La remoción de la DBO y de los SST es por lo general bastante buena, con menor eficiencia demostrada para nutrientes, metales y organismos patógenos. La remoción de la DBO en los sistemas con lentejas de agua se da como resultado de la actividad biológica, la cual es similar a las reacciones que se llevan a cabo en las lagunas facultativas. Las lentejas de agua cubren la superficie de las lagunas y limitan el crecimiento de las algas, reduciendo de este modo el oxígeno del agua para la actividad bacteriana aerobia. Además, limitan la reaeración con ayuda del viento proveniente de la atmósfera, dificultando así la posterior remoción de DBO. Como consecuencia, la carga de DBO debe limitarse a 27,5 kg/Ha.día ó menos.

La superficie mullida que forman las lentejas de agua bloquea la luz solar, aumentando la sedimentación al crear condiciones de reposo. La tasa a la cual los sólidos suspendidos descienden, depende de la naturaleza de éstos.

El nitrógeno se remueve en los sistemas de tratamiento acuáticos por medio de la desnitrificación microbiana, y en menor grado, por la asimilación de las plantas y la cosecha. En los sistemas de lentejas de agua, la desnitrificación ocurre rápidamente; sin embargo, la nitrificación requiere de un suministro de oxígeno. Para remover el nitrógeno se debe lograr un crecimiento óptimo, para lo cual se debe cosechar con frecuencia. La densidad de las plantas en la superficie del agua depende de la temperatura, la disponibilidad de nutrientes y la frecuencia de la cosecha. La densidad característica en una laguna de aguas residuales puede variar de 1,2 a 3,6 kg/m<sup>2</sup>, con una tasa óptima de crecimiento cerca de 0,49 kg/m<sup>2</sup>.día.

La toma por parte de las plantas y la cosecha es el mecanismo de remoción del fósforo de los sistemas con lentejas de agua, pero tiene poca efectividad igual que la

remoción del nitrógeno, pues por lo general se puede eliminar menos de 1mg/l de fósforo mediante este mecanismo.

La remoción de las bacterias y los virus que entran en el sistema vegetal es similar a los mecanismos que se encuentran en funcionamiento en las lagunas: muerte natural, sedimentación, depredación, adsorción y exposición a la luz ultravioleta.

- ***Azolla – Anabaena:***

Es un género de helechos acuáticos pequeños que son nativos de Asia, África y América. Es una planta que crece en lagunas, canales, campos inundados y otros cuerpos de agua dulce en regiones tropicales y templadas. Las plantas flotan en la superficie del agua en forma individual o agrupada y cuando cubren completamente la superficie del agua le dan apariencia de un tapiz verde a rojizo. La *Azolla* no requiere la presencia de una fuente de nitrógeno combinado en las aguas; este helecho puede satisfacer sus necesidades nitrogenadas mediante la asimilación del nitrógeno atmosférico por el alga simbiótica *Anabaena azollae* [Oes 1976; Peters *et al* 1980].

En el centro de cada hoja de *Azolla* se encuentra una cavidad verde oscura la cual es habitada por *Anabaena azollae*. El alga toma el nitrógeno del aire y elabora fertilizante nitrogenado para la *Azolla*. El delicado helecho suministra nutrimentos y una protectora cavidad foliar para el alga. Bajo condiciones satisfactorias de campo la combinación helecho – alga se puede duplicar en peso cada 3 –5 días y fijar nitrógeno atmosférico. La asociación del helecho y el alga puede acumular hasta 2–4 kg nitrógeno/Ha.día [Van Hove y López, 1983].

Es importante la influencia positiva de un tapiz de *Azolla* sobre la economía del agua; la evapotranspiración es inferior a la evaporación en un plano de agua de la misma dimensión sin *Azolla*. La densidad de siembra más favorable de *Azolla* es de 0,5 kg/m<sup>2</sup>. Se recomienda dejar en cada cosecha la tercera parte de la masa vegetal,

como siembra para la próxima, suponiendo que el intervalo entre cosechas es de 5 a 7 días [FAO, 1981].

*Azolla* por sus altos contenidos de proteína cruda, calcio y aminoácidos constituye un alimento promisorio en la alimentación animal. En el caso de los animales monogástricos el factor que pudiera limitar su utilización como alimento es el alto nivel de fibra presentado. Los niveles de fibra bruta son variables pues a medida que el cultivo de *Azolla* envejece aumenta el nivel de fibra y en especial de lignina; aumenta el nitrógeno asociado a la fibra y por lo tanto la digestibilidad de la materia seca y el nitrógeno se reduce significativamente [Querubin *et al*, 1986, citado por Pinto, 2000].

Comparado con otros suplementos se estima que la alimentación con *Azolla* puede ahorrar hasta un 40% en costos de producción porcina. En varias pruebas se encontró que el cerdo experimentaba mayor ganancia de peso en la fase de ceba al alimentarse con *Azolla*, esto se debe a una mayor capacidad digestiva de esta planta en el cerdo y un menor requerimiento de aminoácidos. Por lo tanto, se debe alimentar con *Azolla* a partir de esta etapa de vida, antes la digestibilidad es menor [Lumpkin y Plucknet, 1982].

### **3.5.2.3. Cultivos Agrícolas Asociados**

Los cultivos agrícolas asociados a los sistemas de descontaminación son importantes porque pueden aprovechar los abonos generados en los canales, tales como los lodos y la biomasa de las plantas acuáticas. Para tal efecto se pueden tener cultivos en hileras entre los canales tales como el plátano, el cambur y la lechosa entre otros, los cuales toleran relativamente bien la humedad y aprovechan muy bien la materia orgánica que se les adiciona.

Las pasturas y otros cultivos que se irrigan con los efluentes de los biodigestores o los canales se pueden también considerar como asociados pues

aprovechan los nutrientes, la materia orgánica y la humedad de los residuos para la producción. Se evita así el uso de las fuentes de agua para disponer estos residuos y se obtiene un pasto de buena calidad para la producción bovina de leche o de carne.

#### **3.5.2.4. Policultivos de Peces**

Las aguas resultantes de los canales, o aún de los biodigestores, puede emplearse también en el abonamiento de estanques de peces para estimular la productividad primaria y aumentar la producción. El efluente de los canales puede aplicarse en mayor cantidad que el de los biodigestores por tener menor contenido de materia orgánica. En ambos casos se requiere de agua limpia para adicionar al estanque. Es recomendable sembrar ejemplares de distintas especies que se complementen entre ellos y así aprovechar más el alimento disponible.

### **3.6. LA SOSTENIBILIDAD** [Silva V., 2000]

Las tecnologías de tratamiento aplicadas con éxito en ciertas naciones pueden no ser favorables en otros lugares especialmente si los países están en vías de desarrollo. Puesto que todos los desarrollos tecnológicos tienen como alcance mejorar la calidad de vida de la comunidad, los países en desarrollo deben ir en la búsqueda de reducir los riesgos a la salud ocasionados por un manejo inadecuado de sus residuos y alcanzar un crecimiento sostenible, económico que conduzca a más altos ingresos per cápita para la población [Doelle, 1996]. Por lo tanto, la meta no sólo será remediar los problemas obtenidos como resultado de las revoluciones industriales, sino también ir en la búsqueda de un manejo sostenible del agua que permita la recuperación de recursos valiosos que impulsen el desarrollo de las comunidades.

Los Sistemas Integrados de Tratamiento de Aguas Residuales se presentan como la alternativa segura para lograr el anterior objetivo enmarcada en la idea de Lewis (1987), quién plantea que se debe desarrollar una estrategia socioeconómica donde el manejo de residuos (tecnología apropiada = cero emisiones) debe llegar a

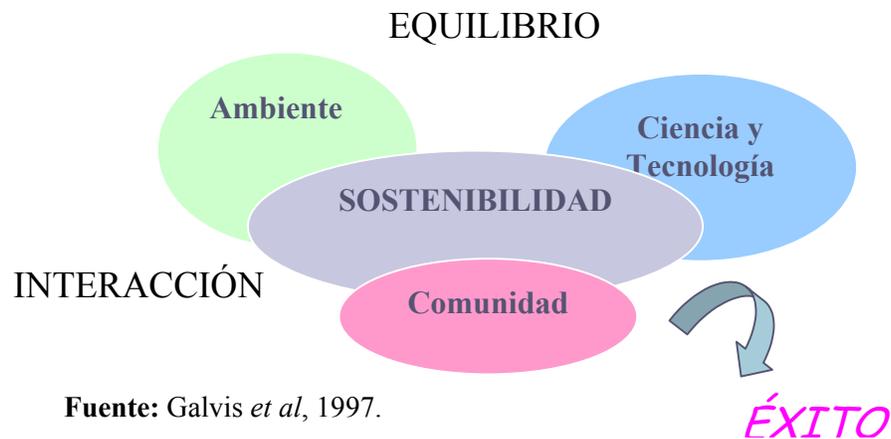
convertirse en una parte integral del nuevo sistema de tecnología limpia. En línea con este enfoque socio económico de los sistemas de tratamiento de aguas residuales aparece un concepto básico: **la sostenibilidad**.

La sostenibilidad ha surgido a partir de la concepción del denominado desarrollo sostenible. Esta idea fue incorporada en las políticas generales del sector agua potable y saneamiento a nivel mundial a partir de las conclusiones de la Cumbre de la Tierra celebrada en Río en 1992. El concepto de sostenibilidad introducido a partir de las evaluaciones de la Década del Agua, expresa el requerimiento de que las obras y proyectos sigan funcionando a través del tiempo, brindándole a los usuarios los beneficios que se esperan de ellos, con la preservación de los recursos naturales.

### ***3.6.1. ¿Qué es la sostenibilidad?***

Una definición apropiada a los sistemas integrados es la dada por Doelle que define la sostenibilidad como un mecanismo futuro de la sociedad para que ella sea capaz de obtener sus recursos por si misma sin depender para sus necesidades básicas de obtener recursos externos, lo que significa utilizar sus propios recursos renovables para surtir sus requerimientos de alimento, forraje, fertilizante y energía.

En la Figura N°3.10 se presenta un esquema que ilustra la interacción entre las tecnologías de tratamiento, el medio ambiente y la comunidad. En esta figura se aprecia que existe una región demarcada, que delimita las alternativas sostenibles desde el punto de vista técnico y económico. El desequilibrio de alguno de estos factores en la ejecución del proyecto conduce a soluciones no sostenibles que pueden conducir al fracaso.



**Figura N°3.10:** Marco conceptual para ilustrar la búsqueda de soluciones sostenibles

Así, un manejo sostenible y funcional de las aguas residuales comienza a nivel del usuario y depende del “software” o componente humano. Únicamente cuando la percepción de necesidad y anticipación para un sistema de reuso de aguas residuales basado en sistemas integrados ha sido internalizado a nivel de usuario, la planeación e implementación será exitosa. Una vez el componente software ha sido integrado hacia el desarrollo del proyecto, el hardware o componente tecnológico puede actuar para promover un sistema de aguas residuales sostenible.

### 3.6.2. Beneficios de la Sostenibilidad [Adaptado de Duque *et al*, 1996]

La práctica de la sostenibilidad en los sistemas integrados conduce a diferentes beneficios:

- ✓ Minimización y control de la contaminación de los recursos aire, agua y suelo a partir del uso de tecnologías apropiadas y más limpias que respetan los ciclos de la naturaleza.
- ✓ Adecuado manejo y reuso de excretas, aguas residuales y desechos.
- ✓ El beneficio percibido por mejoras en las condiciones ecológicas, sobre todo si se involucra dentro del proyecto a las cuencas abastecedoras y receptoras del agua.
- ✓ Las mejoras percibidas en las condiciones de salud, de bienestar y de mejoramiento de la calidad de vida, tanto individual como colectivamente.

- ✓ Optimizar el reciclado y la generación de recursos en el sistema integrado que le puedan generar ingresos económicos a los usuarios del sistema de tratamiento.
- ✓ Proyección hacia un desarrollo sostenible.
- ✓ Reafirmación de las personas y de la comunidad en su capacidad de generar, establecer y mantener su propio desarrollo de acuerdo a sus condiciones socioeconómicas y culturales.
- ✓ Los costos de inversión, administración, operación y mantenimiento son recuperados por quienes se benefician del sistema.
- ✓ Las instituciones encargadas de realizar las intervenciones en el tratamiento de aguas residuales (agencias de gobierno) harán inversiones con impacto real y se beneficiarán de la participación de los usuarios, quienes asumen la operación y mantenimiento del sistema, tareas rutinarias que consumen recursos de estas instituciones [Adaptado de Duque *et al*, 1996].

### **3.7. ASPECTOS DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA**

El conocimiento de los factores microbiológicos y bioquímicos que ocurren en la fermentación metanogénica es indispensable para entender la cinética de este proceso, y esto permite controlarlo e incidir sobre ellos para obtener resultados satisfactorios.

Hoy se admite que en la fermentación bacteriana intervienen poblaciones microbianas diversas, en la que se distinguen tres etapas:

- 1) **Hidrólisis:** Es la fase donde a través de reacciones enzimáticas los compuestos orgánicos de alto peso molecular se degradan en compuestos más sencillos utilizables como fuente de energía, síntesis de nuevo material celular.

- 2) **Acidogénesis:** Esta segunda etapa involucra la conversión biológica de los compuestos resultantes de la hidrólisis en compuestos identificables de peso molecular intermedio.
- 3) **Metanogénesis:** donde los compuestos intermedios son transformados en productos finales simples, principalmente metano y dióxido de carbono.

Al menos cuatro grupos tróficos diferentes de bacterias han sido aislados en digestores anaerobios, pudiendo ser diferenciados sobre la base de los sustratos fermentados y los productos finales formados. Estos cuatro grupos metabólicos entre los cuales tenemos:

- a) Las *bacterias hidrolíticas y fermentativas*, las cuales convierten una variedad de compuestos orgánicos como polisacáridos, lípidos y proteínas en otros productos como el ácido acético, H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>, compuestos monocarbonados, ácidos grasos orgánicos y otros compuestos policarbonados.
- b) Las *bacterias acetogénicas* productoras de hidrógeno, las cuales incluyen obligatoriamente a las dos especies facultativas que pueden transformar los productos del primer grupo, los ácidos orgánicos de más de dos átomos de carbono (butírico y propiónico) y los alcoholes policarbonados (etanol y propanol) en hidrógeno y acetato.
- c) Las *bacterias homoacetogénicas*, las cuales pueden convertir un espectro amplio de compuestos multi o monocarbonados en ácido acético.
- d) Las *bacterias metanogénicas*, que transforman el H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> y compuestos monocarbonados (etanol, CO y metilamina) en acetato, o pueden formar metano de la decarboxilación del acetato [Scriban, 1982].

La degradación de la materia orgánica para producir metano, depende de la interacción de varios grupos diferentes de bacterias. Una operación estable del digestor requiere que estos grupos de bacterias se encuentren en un equilibrio dinámico y armónico. Los cambios en las condiciones ambientales pueden afectar este equilibrio, y resultar en un aumento de microorganismos intermediarios que pueden inhibir todo el proceso. Esto tiene una importancia extrema para comprender hacia qué direcciones se mueven los procesos microbiológicos y bioquímicos y poder dirigir el sistema de digestión para producir biogas [Marchain, 1992].

Por otro lado, el proceso de conversión anaerobia depende de diversos factores, por ejemplo: el pH, la temperatura, la disponibilidad de nutrientes, la presencia de sustancias tóxicas, el tiempo de retención, la relación carbono – nitrógeno y el nivel de carga [An Bui Xuan, 1996].

- **pH**

El rango de pH óptimo es de 6,6 a 7,6. Los ácidos grasos volátiles (AGV) y entre ellos el acético, tienden a disminuir el pH del sustrato. Si las bacterias metanogénicas no alcanzan a convertir rápidamente los AGV como lo hacen las bacterias acetogénicas, éstos se acumulan y disminuyen el pH en el digestor. Sin embargo, el equilibrio  $\text{CO}_2$ -bicarbonato opone resistencia al cambio de pH [Marchain, 1992].

Existen dos métodos prácticos para corregir los bajos niveles de pH en el digestor. El primero es detener la alimentación del digestor y dejar que las bacterias metanogénicas asimilen los AGV; de esta forma aumentará el pH hasta un nivel aceptable. Al detener la alimentación disminuye la actividad de las bacterias fermentativas y se reduce la producción de los AGV. Una vez que se haya restablecido el pH se puede continuar la alimentación del digestor pero en pocas cantidades, después se puede ir aumentando gradualmente para evitar nuevos descensos en el pH.

El segundo método consiste en adicionar un buffer para aumentar el pH como el agua con cal. El carbonato de sodio constituye una opción más costosa, pero previenen la precipitación del carbonato de calcio. Los requerimientos de buffer varían según el líquido residual, los sistemas de operación y tipos de operación. Las normas para calcular estos requerimientos han sido desarrolladas por Pohland y Suidon en 1978.

- **Temperatura**

Los niveles de reacción química y biológica aumentan normalmente con el incremento de la temperatura. Para los digestores de biogas esto es cierto dentro de un rango de temperatura tolerable para diferentes microorganismos [Schmid y Lipper, 1969]. Las altas temperaturas causan una declinación del metabolismo, debido a la degradación de las enzimas; y esto es crítico para la vida de las células. Los microorganismos tienen un nivel óptimo de crecimiento y un metabolismo dentro de un rango de temperatura bien definido, particularmente en los niveles superiores, los cuales dependen de la termoestabilidad de la síntesis de proteínas para cada tipo particular de microorganismo.

Las bacterias metanogénicas son más sensibles a los cambios de temperatura que otros organismos en el digestor. Esto se debe a que los demás grupos crecen más rápido, como las acetogénicas, las cuales pueden alcanzar un catabolismo sustancial, incluso a bajas temperaturas [Schimid y Lipper, 1969].

Existen tres rangos de temperatura para la digestión de residuales: el primero es el mesofílico (de 20 a 45 °C), el segundo es el termofílico (superior a 45 °C) y el tercer rango psicofílico (de 10 a 25 °C). El óptimo puede ser de 35 °C a 55 °C [Gunnerson, 1986]. La ventaja de la digestión termofílica es que la producción de biogas es aproximadamente el doble que la mesofílica, así que, los biodigestores termofílicos pueden ser la mitad en volumen que los mesofílicos, manteniendo su eficiencia general.

Se han realizado numerosos trabajos sobre la digestión termofílica en países templados. Sin embargo, se requieren considerables cantidades de energía para calentar los residuales hasta 55 °C [Cullimore *et al*, 1985].

- **Nutrientes**

Además de una fuente de carbón orgánico, los microorganismos requieren de nitrógeno, fósforo y otros factores de crecimiento que tienen efectos complejos. Los niveles de nutrientes deben de estar por encima de la concentración óptima para las bacterias metanogénicas, ya que ellas se inhiben severamente por falta de nutrientes. Sin embargo, la deficiencia de nutrientes no debe ser un problema con los alimentos concentrados, pues estos aseguran cantidades adecuadas de nutrientes.

Por otra parte, la descomposición de materiales con alto contenido de carbono ocurre más lentamente, pero el período de producción de biogas es más prolongado. Los materiales con diferentes niveles de carbono - nitrógeno difieren notablemente en la producción de biogas, por ejemplo, dicha relación en residual porcino es de 3 a 9; en vacunos de 10 a 20; en gallinas de 5 a 8; para humanos es de 8 y para residuos vegetales es de 35. La relación óptima se considera en un rango de 30:1 hasta 10:1, una relación menor de 8:1 inhibe la actividad bacteriana debido a la formación de un excesivo contenido de amonio [Werner, 1989].

- **Toxicidad**

Los compuestos tóxicos incluso en bajas concentraciones afectan la digestión disminuyendo los niveles de metabolismo. Las bacterias metanogénicas son generalmente las más sensibles, aunque todos los grupos pueden ser afectados [Marchain, 1992].

Un nutriente esencial también puede ser tóxico si su concentración es muy alta. En el caso del nitrógeno, es importante mantener un nivel óptimo para garantizar un buen funcionamiento sin efectos tóxicos. Por ejemplo, en alimentos para el ganado

con elevado contenido de proteína, un desbalance debido a altos contenidos de nitrógeno y bajas disponibilidades energéticas, causa toxicidad por generación de amonio. Usualmente, el nivel de amonio libre debe ser mantenido en 80 ppm. Sin embargo, una concentración alta, de alrededor de 1500-3000 ppm, puede ser tolerada [Gunnerson, 1986]. Marchaim ha informado señales iniciales de inhibición a una concentración de  $\text{NH}_4^+$  de aproximadamente 800 ppm.

Se debe tener precaución para evitar la entrada al digestor de ciertos iones metálicos, sales, bactericidas y sustancias químicas sintéticas. Estudios previos han informado la reducción de gas cuando son utilizadas excretas de animales tratados con antibióticos [Yougfu, 1989].

- **Nivel de carga**

Este parámetro se calcula como la materia seca total (MS) o materia orgánica (MO) que es cargada o vertida diariamente por metro cúbico de volumen de digestor. La MO o sólidos volátiles (SVT) se refiere a la parte de la MS o sólidos totales (STT), que se volatilizan durante la incineración a elevadas temperaturas. Los SVT contienen componentes orgánicos, los que teóricamente deben ser convertidos a metano. Los líquidos residuales de animales pueden tener un contenido de MS mayor del 10%. Según los requerimientos operacionales para un reactor anaerobio, el contenido de MS no debe exceder el 10% en la mayoría de los casos, por eso, algunos residuales de granjas se deben diluir antes de ser tratados [Lober, 1974].

La eficiencia de la producción de biogas se determina generalmente expresando el volumen de biogas producido por unidad de peso de MS o SVT. La fermentación de biogás requiere un cierto rango de concentración de MS que es muy amplio, usualmente desde 1% al 30%. La concentración óptima depende de la temperatura. En China, la concentración óptima es del 6% en el verano a temperaturas entre 25-27 °C y entre 10 y 12 % en la primavera a temperaturas de 18-23 °C [Yougfu, 1989].

- **Tiempo de retención**

Existen dos parámetros para identificar el tiempo de retención de las sustancias en el digestor:

- a) El tiempo de retención de los sólidos biológicos (TRSB) que se determinan dividiendo la cantidad de MO o SV que entra al digestor entre la cantidad de MO que sale del sistema cada día. Se asume que el TRSB representa la media del tiempo de retención de los microorganismos en el digestor.
- b) El tiempo de retención hidráulico (TRH) es el volumen del digestor (VD) entre la media de la carga diaria.

Estos parámetros son importantes para los digestores avanzados de alto nivel, los cuales han alcanzado un control independiente del TRSB y del TRH a través de la retención de la biomasa. La medición del TRH es más fácil y más práctico que el TRSB al nivel de las granjas [An Bui Xuan, 1996].

### ***3.8. ANTECEDENTES DEL TRATAMIENTO DE EFLUENTES DE GRANJAS PORCINAS EN VENEZUELA***

La determinación de las características físico-químicas de los efluentes líquidos de granjas porcinas han permitido clasificarlos como altamente agresivos. Algunos estudios realizados en el país han presentado la siguiente información: Cárdenas y Valdivieso (1976), evaluaron el líquido residual proveniente de una granja porcina de 3040 cerdos, obteniendo un aporte unitario de 6,4 l/cerdo.d, con DBO<sub>5,20</sub> promedio de 5000 mg/l y DQO promedio de 24000mg/l [Mezones y Palacios, 1985].

Rebolledo y López (1983), caracterizaron el líquido residual proveniente de una granja porcina cebadora de lechones, con 5335 cerdos confinados en corrales

según diferentes pesos, obteniendo un gasto unitario promedio de 10 l/cerdo.d, con  $DBO_{5,20}$  promedio de 2900 mg/l y DQO promedio de 10700 mg/l.

La Dirección de Investigación del Ambiente (1985), evaluó los líquidos residuales de una granja porcina de 6000 cerdos, obteniendo un aporte unitario de 8 l/cerdo.día, con  $DBO_{5,20}$  promedio de 5100 mg/l y DQO promedio de 16800 mg/l.

Las diferencias encontradas en estos estudios pueden atribuirse a los criterios de lavado, formas de evacuación de las excretas, sistemas de producción y alimentación. Se puede observar asimismo la poca abundancia de información generada en el país, evidenciando la necesidad de ejecutar estudios dirigidos a la caracterización integral de los desechos producidos por esta industria que cada día cobra más importancia.

La descarga incontrolada de residuos líquidos con características similares a las mencionadas, evidentemente ocasionan deterioro de la calidad del ambiente, afectando los cuerpos receptores de agua. Esto se manifiesta en pérdida de la capacidad para sustentar la vida acuática, alterando el equilibrio indispensable para preservar el recurso.

Para poder alcanzar soluciones racionales, es recomendable conocer las características de las masas receptoras, su grado de polución y contaminación, así como las características hidráulicas para definir la capacidad de autodepuración y en consecuencia la magnitud e intensidad de las cargas que pueda aceptar sin causar daño al sistema.

El análisis integral de las características del líquido residual y del cuerpo receptor, determinará la intensidad del tratamiento requerida para los líquidos residuales a fin de que su disposición no constituya un problema ambiental. Las operaciones y procesos de tratamiento de los desechos tienen como objetivo

modificar las características físico-químicas y biológicas de los mismos, reduciendo su potencial de polución y permitiendo su disposición sin afectar al ambiente.

Odehnal (s.f) y otros propusieron para los líquidos residuales de una granja porcina de 14000 cerdos, un sistema que consiste en tres lagunas anaerobias (58% en remoción de materia orgánica carbonácea, en cada una) en serie, seguidas de una laguna aereada (55% en remoción) que a su vez descarga a una laguna de pulimento y sedimentación. De la última laguna se recircula agua a la primera para aumentar la eficiencia del tratamiento. El pre-tratamiento consiste en un filtro rotatorio o tamiz donde se elimina una gran cantidad de sólidos, que se ponen a secar en zanjas.

La granja porcina Tirma de 6800 cerdos, ubicada en San Antonio de Los Altos, Estado Miranda, tiene una planta de tratamiento para sus líquidos residuales consistente en una laguna anaerobia seguida de un sistema de aeración extendida. El líquido a tratar con una  $DBO_{5,20}$  de 9100mg/l, cumple un tiempo de retención en la laguna anaerobia de 57 días, donde se logra una remoción del 97% en  $DBO_{5,20}$ . En el estanque de aeración extendida se remueve un 90% de la materia orgánica ( $DBO_{5,20}$ ), y a continuación, un sedimentador remueve los sólidos que luego son recirculados al estanque de aeración. El efluente clarificado pasa a una cámara de contacto de cloro para la desinfección [Mezones y Palacios, 1985].

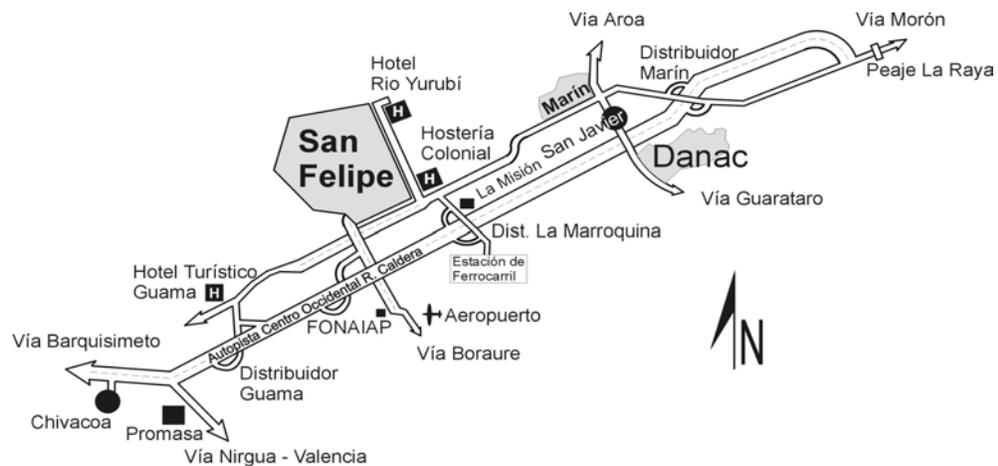
El sistema de descontaminación con fines productivo del Modelo Físico establecido por la Fundación POLAR , ubicada en el Municipio San Felipe del estado Yaracuy, está constituido por un biodigestor plástico de flujo continuo, un sistema de distribución de efluentes y ocho lagunas destinadas a la producción de plantas acuáticas *Azolla-Anabaena* y *Lemna minor*. Las aguas residuales generadas en la unidad de producción porcina son aprovechadas mediante este sistema de tratamiento, que contribuye a minimizar los efectos negativos al ambiente y a optimizar el manejo de los recursos disponibles en la granja.

#### 4. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

A continuación se presenta la localización y dimensiones del Modelo Físico, componente animal del sistema, alimentación para cada tipo de cerdo y descripción del sistema de tratamiento de efluentes.

##### 4.1. LOCALIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LA GRANJA PORCINA

La granja de cerdos se encuentra dentro del Modelo Físico del Programa de Agricultura Tropical Sostenible (ATS), el cual identifica un sistema de producción diversificado e integrado, perteneciente a la Fundación POLAR, antiguamente conocido como Fundación para el Desarrollo Agrícola DANAC, ubicada en la vía San Javier – Guarataro, en el municipio San Felipe del Estado Yaracuy, Venezuela, como se observa en la siguiente mapa.



Fuente: Messa *et al*, 1996.

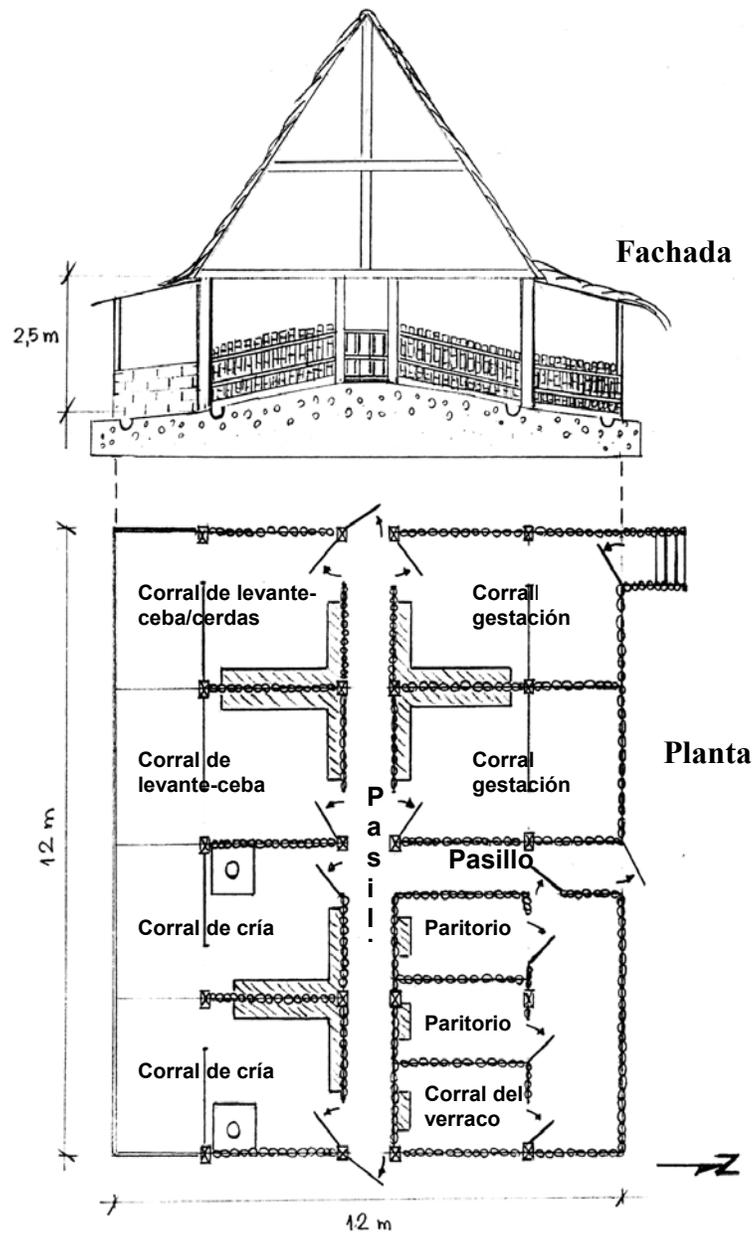
**Figura N°4.1:** Localización de Fundación DANAC en la Región Centro-Occidental de Venezuela

El modelo ocupa una superficie total de 16 Ha para la actividad agropecuaria, rodeadas por un bosque de galería en sus linderos norte y sur (10 Ha aproximadamente), y el recorrido por el borde sur de la Quebrada El Naranjal, afluente del Río Yaracuy. Se ubica en una zona correspondiente a Bosque Seco

Tropical [Holdridge, 1987], a 107 m sobre el nivel del mar, con una precipitación promedio anual de 1296 mm y un período de lluvias definido entre los meses de mayo y noviembre. La evaporación promedio mensual es de 177 mm y la temperatura media mensual de 27°C. Los vientos predominantes son los alisios que penetran desde el Mar Caribe.

La unidad de cerdos es una instalación con un área de construcción de 169 m<sup>2</sup>, la cual fue establecida con una alta proporción de recursos locales, entre ellos: bambú, caña brava, tallos y hojas. La instalación dispone de dos paritorios, dos corrales de cría, dos corrales para manejo de cerdas de cría, dos corrales para crecimiento y ceba y un corral para el manejo del verraco, como se observa en la Figura N°4.2. La unidad de cerdos, cuenta asimismo con embarcadero y un pasillo central para el tránsito.

Los pisos fueron construidos en concreto con un desnivel del 5% desde el pasillo central de la unidad, para favorecer el drenaje lateral de las aguas de lavado hacia un sistema de drenajes para la recolección y distribución de residuales hacia el biodigestor de flujo continuo. Para dirigir los residuales líquidos y sólidos hacia el biodigestor, hay un nuevo desnivel del 2% desde el extremo más alejado de la instalación hasta el sitio de salida de los efluentes. Los corrales de cría disponen de dos cajones de calefacción accionados con biogas para garantizar una adecuada temperatura a los lechones durante los primeros días de nacidos. El suministro de alimentos y agua se realiza mediante comederos construidos con tubos de arcilla cocida empotrados en concreto y bebederos tipo chupón [Messa *et al*, 1998].



Fuente: Messa *et al*, 1996.

Figura N°4.2: Distribución de los corrales en la granja

La alimentación de los animales desde la etapa de crecimiento se basa en una dieta balanceada conocida como la dieta del Modelo Físico compuesta por jugo de

caña de azúcar, extraído mediante la molienda de los tallos en un trapiche de tres mazas y aceite de palma africana, como fuentes de energía; en la Tabla N°4.1 se presenta la composición química de la caña de azúcar. La fuente de proteína la constituyen las plantas acuáticas *Azolla* y *Lemna*, grano de soya integral y una mezcla de minerales y vitaminas, en la Tabla N°4.2 se muestra un análisis de la semilla y productos de proteína de soya. La presencia en el grano de soya de sustancias antimetabólicas (antitripsina) que inhiben los procesos proteolíticos durante la digestión del alimento [Basso y Vieites, 1997], ameritan su cocción hasta ebullición durante 30-40 min en un fogón donde se quema el biogas, proveniente del biodigestor.

**Tabla N°4.1:** Composición química de la caña de azúcar

| <b>Indicador</b>        | <b>%MS</b> |
|-------------------------|------------|
| Materia Seca            | 29         |
| Proteína bruta (Nx6,25) | 2          |
| Hemicelulosa            | 20         |
| Celulosa                | 27         |
| Lignina                 | 7          |
| Azúcares solubles       | 40         |
| Cenizas                 | 5          |

Fuente: Figueroa, 1999.

**Tabla N°4.2:** Análisis típico de la semilla y productos de proteína de soya

| <b>Componentes (%)</b> | <b>Grano de soya</b> | <b>Harina desgrasada de soya</b> | <b>Concentrado de proteína de soya</b> |
|------------------------|----------------------|----------------------------------|--|
| <b>Humedad</b>         | 12,7                 | 7,0                              | 4,9                                    |
| <b>Proteína</b>        | 37,9                 | 52,0                             | 70,0                                   |
| <b>Grasa</b>           | 21,0                 | 1,0                              | 0,3                                    |
| <b>ELN</b>             | 19,5                 | 31,0                             | 10,8                                   |
| <b>Fibra Cruda</b>     | 4,3                  | 3,0                              | 2,6                                    |
| <b>Ceniza</b>          | 4,6                  | 6,0                              | 4,8                                    |

ELN: Extracto libre de nitrógeno

Fuente: Central Soya Chemuray, Datos y hechos acerca de la soya.

La alimentación es realizada dos veces al día, de acuerdo a la edad del cerdo, en etapa de cría se alimentan de leche de la madre más iniciador o preiniciador, en etapa de iniciación (desde el destete hasta alcanzar 25-30 kgPV) iniciador y suero de leche (suero verde); cerdos en crecimiento (25-60 kgPV), ceba (60-90 kgPV), cerdas y padrote se les suministra la dieta del Modelo Físico que se muestra en las Tabla N°4.3 y 4.4, en el orden siguiente: plantas acuáticas, núcleo proteínico (grano de soya, vitaminas y minerales), jugo de caña o suero verde y aceite crudo de palma (cerdas lactantes). Esta modalidad de suministro ha permitido que los animales consuman todo el alimento de manera casi simultánea. Además, es importante señalar que la dieta de los cerdos está presta a modificaciones en cuanto al reemplazo temporal de alguno(s) de sus elementos, esto es debido básicamente a la disponibilidad de recursos dentro de la granja, de tal manera de aprovechar óptimamente dichos recursos.

**Tabla N°4.3:** Suministro de alimentos por cerdo

| <b>Suministro</b>                     | <b>Grano<br/>soya<br/>(Kg)</b> | <b>Vit-<br/>minerales<br/>(Kg)</b> | <b>Azolla-<br/>Lemma<br/>(Kg)</b> | <b>Jugo de caña<br/>o suero verde<br/>(l)</b> | <b>Masa<br/>Iniciador<br/>(Kg)</b> |
|---------------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|---|------------------------------------|
| <b>Corral de padrote</b>              | 0,20                           | 0,25                               | 6                                 | 7,5   | -                                  |
| <b>Cerda embarazada</b>               | 0,25                           | 0,25                               | 6                                 | 7,5   | -                                  |
| <b>Cerda destetada</b>                | 0,25                           | 0,25                               | 6                                 | 8   | -                                  |
| <b>Corral de ceba – finalización</b>  | 1                              | 0,167                              | 7                                 | 13,3  | -                                  |
| <b>Etapas de Iniciación - Destete</b> | -                              | -                                  | -                                 | 4   | 1,4                                |

Fuente: Granja Porcina del Modelo Físico, 2001.

**Tabla N°4.4:** Composición y aportes de la dieta de cerdas de cría del Modelo Físico

| <b>Materia Prima</b>                            | <b>%</b> |
|---|----------|
| Jugo de caña                                    | 45       |
| Grano de soya                                   | 23       |
| Plantas acuáticas                               | 15       |
| Aceite crudo de palma africana                  | 10       |
| Mezcla de vit-minerales                         | 7        |
| <b>Aporte</b>                                   |          |
| Proteína Cruda PC (g/kg Materia Seca)           | 125,0    |
| Energía Metabolizable EM (Mcal/kg Materia Seca) | 3,1      |

**Fuente:** Messa et al, 2000.

La operación sanitaria del rebaño se realiza de acuerdo con prácticas tradicionales. El manejo reproductivo se basa en la monta natural controlada. De acuerdo con las dimensiones de la unidad, se estableció el parto de dos cerdas por mes. El destete es realizado a las cuatro semanas. La producción de cerdos se maneja bajo estabulación, lo cual se refiere a los animales criados en un corral o establo.

El componente animal se estableció por un pie de cría inicial (10 madres y 1 verraco), lechones, cerdos de destete y engorde. El componente racial del pie de cría es híbrido de Landrace x Yorkshire x Duroc (madres) y F1 de Duroc x Hampshire (verraco). La función de este componente es la producción de animales (lechones, cerdos cebados y animales de descarte) para la venta y la generación de excretas para el funcionamiento del biodigestor.

El manejo de los animales está a cargo de una persona como se aprecia en la Figura N°4.3, con la supervisión y apoyo de un técnico agrícola. El jornalero encargado de la granja, sistematiza sus actividades en la jornada diaria como se muestra en la Tabla N°4.5.



**Figura N°4.3:** Lavado y mantenimiento de instalaciones

**Tabla N° 4.5 :** Sistematización de actividades en la producción de cerdos del Modelo Físico de ATS

| Orden | Labor  | Tiempo de dedicación <sup>1</sup> (%) |
|-------|--|---------------------------------------|
| 1     | Revisión general de animales   | 2,2                                   |
| 2     | Chequeo de celo-monta y manejo reproductivo                          | 6,5                                   |
| 3     | Molienda de caña de azúcar   | 6,8                                   |
| 4     | Cosecha de plantas acuáticas   | 3,3                                   |
| 5     | Suministro de alimentos a animales                                   | 6,5                                   |
| 6     | Recolección de excretas en corrales                                  | 4,3                                   |
| 7     | Carga de tanquilla de entrada del biodigestor                        | 4,3                                   |
| 8     | Lavado y mantenimiento de instalaciones                              | 6,5                                   |
| 9     | Pesado y cocción de grano de soya                                    | 4,3                                   |
| 10    | Mantenimiento, resiembra y llenado de estanques de plantas acuáticas | 13,0                                  |
| 11    | Carga y traslado de bagazo de caña                                   | 4,3                                   |
| 12    | Cosecha y traslado de plantas acuáticas                              | 3,3                                   |
| 13    | Suministro de alimentos a animales                                   | 6,5                                   |
| 14    | Mantenimiento de área de procesamiento de alimentos y equipos        | 8,7                                   |
| 15    | Otras labores  | 13,0                                  |

<sup>1</sup> Porcentaje de tiempo de un jornal de 8 horas

**Fuente:** Messa *et al*, 2000.

#### 4.2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE DESCONTAMINACIÓN

El sistema de descontaminación productiva del Modelo Físico está constituido por un biodigestor plástico tipo CENDITRIPA integral, que se observa en la Figura N°4.4, un sistema de distribución de efluentes y ocho lagunas destinadas a la producción de plantas acuáticas *Azolla-Anabaena* y *Lemna minor* tal como se observa en la Figura N°4.5 y cuyas dimensiones se muestran en la Tabla N°4.6. Actualmente, se trabaja para establecer la producción de peces.



**Figura N°4.4:** Biodigestor plástico de flujo continuo

En las adyacencias de las lagunas se asocian la producción de musáceas (plátano, topocho y cambur), palmas aceiteras (corozo, pijiguo y africana), especies leguminosas para cobertura (*Arachis pintoi* y *Centrosema sp*) y algunas plantas ornamentales.



**Figura N°4.5:** Lagunas productoras de *Azolla* y *Lemna*

**Tabla N° 4.6:** Dimensiones de los estanques para la producción de plantas acuáticas en el Subsistema Cerdos del Modelo Físico de ATS

| Parámetro              | Identificación de la Laguna |       |       |       |       |       |       |       | Dimensión total |
|------------------------|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------------|
|                        | 1                           | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | Estimada        |
| Área (m <sup>2</sup> ) | 196,0                       | 147,1 | 151,2 | 150,6 | 154,9 | 130,2 | 194,6 | 181,4 | 1310            |
| Vol. (m <sup>3</sup> ) | 98,0                        | 88,3  | 104,3 | 90,4  | 92,9  | 70,3  | 87,5  | 108,8 | 740             |

El biodigestor está protegido de los animales por una cerca, alrededor de la cual se establecieron setos de cayena como se observa en la Figura N°4.6. Para disminuir el efecto de los rayos ultravioleta sobre la bolsa del biodigestor, se instaló una troja con hojas de palma; las cuales, han sido sustituidas por algunas plantas de parchita, medidas que persiguen favorecer la vida útil del plástico.



**Figura N°4.6:** Biodigestor plástico

Las funciones del sistema de descontaminación con fines productivo del modelo físico son amplias y están enfocadas a la protección del medio ambiente y conservación de los recursos naturales, así como optimizar el manejo de los recursos disponibles en la granja. Entre ellas tenemos:

- La descontaminación de las aguas servidas de la unidad de cerdos.
- La conservación de las aguas de los ríos, los suelos y la reducción de los malos olores, la cual es de gran importancia ambiental y económica para la granja y las comunidades cercanas.
- La reducción de enfermedades en humanos y animales, causadas generalmente por focos de contaminación ambiental.
- La producción de abono orgánico (líquido). El abono líquido o efluente del biodigestor es empleado para fertilizar en forma controlada las lagunas destinadas a la producción de *Lemna minor* y *Azolla-Anabaena*, las cuales se destinan posteriormente a la dieta de los cerdos como fuente de proteína. El agua de las lagunas se destina al riego en las áreas de cultivo de yuca, caña de azúcar y pastos.
- La producción de una fuente alterna de energía renovable, a través de la generación de biogas.

- Obtener beneficios económicos, generados a partir de la reducción de costos en descontaminación, producción de proteína vegetal y la disminución en el uso de recursos energéticos convencionales.
- Servir como unidad demostrativa para estudiantes, técnicos y agricultores que visitan el modelo físico; permitiendo que se divulgue el conocimiento en sistemas de descontaminación con fines productivos.

El biodigestor plástico de flujo continuo tipo CENDITRIPA, fue instalado contando con el apoyo técnico de la Sociedad Científica CENDI. Se diseñó tomando en consideración la población porcina a establecerse en la unidad, la cual corresponde al pío de cría inicial antes mencionado, 140 lechones nacidos al año; de los cuales, se ceban aproximadamente 60 cerdos/año. Los componentes y características del biodigestor instalado en el modelo físico son:

- a. **Fosa:** Excavada en tierra a nivel y recubierta con una mezcla tierra-cemento, en proporción 9:1; de 17 m de longitud, 1m de profundidad y 2 m y 1,5 m de ancho en la parte superior y el fondo, respectivamente.
- b. **Tanquillas de entrada y salida:** En cada extremo de la fosa se construyó una tanquilla, de un metro cúbico de capacidad cada una, y con salida mediante un tubo de concreto de 8", al cual se ajustó la bolsa plástica como se observa en la Figura N°4.7. La primera recibe las aguas de lavado y excretas (efluentes) de las instalaciones porcinas a través de canales de drenaje y tubos de PVC de 6" de diámetro. La tanquilla de salida recibe los efluentes del biodigestor y los dirige al sistema de distribución a las lagunas de producción de plantas acuáticas.



A) Entrada al biodigestor



B) Salida del biodigestor

**Figura N°4.7:** Tanquillas de entrada y salida

- c. **Bolsa:** Constituye uno de los elementos más importantes del biodigestor, ya que en ella se lleva a cabo el proceso biológico de degradación de los desechos orgánicos, mediante la acción de bacterias en condiciones anaerobias, generando biogas y abono orgánico. Se utilizó un plástico doble tubular (uno dentro del otro), de 17 metros de longitud y 300 micrones de espesor. En la bolsa no sólo se procesan los desechos sino que además se almacena el biogas generado.
- d. **Conducto de distribución de biogas:** En la parte central de la bolsa se instaló la salida para el biogas, la cual, conecta la bolsa con una manguera de PVC de 2" de diámetro, que lleva el biogas por vía aérea a los puntos de consumo. En la manguera se instaló una llave de paso que permite regular la salida del biogas.
- e. **Válvula de seguridad:** A dos metros de la conexión de la bolsa a la manguera se instaló una válvula de seguridad, constituida por un envase plástico aforado, el cual se llena de agua a través de un orificio. Su función es aliviar la presión del gas dentro de la bolsa; ante un aumento de presión, el gas

escapa a través de ella. Lo ideal es que no se desperdicie el gas, por lo que debe ser almacenado en reservorios para su posterior utilización.

En el Modelo Físico el biogas generado en el proceso de digestión es empleado en la cocción de grano de soya, la calefacción de lechones recién nacidos, a través de los cajones; y en la cocción de alimentos en un fogón artesanal instalado en la vivienda ecológica del modelo físico.

El biodigestor del modelo físico se diseñó con un volumen total de  $36 \text{ m}^3$ , en donde se distribuye un 70% del volumen en fracción líquida (mezcla de excretas y agua) y el 30% restante para almacenamiento de biogas. La carga inicial del biodigestor se realizó luego de su llenado con agua, mediante el aprovechamiento de las excretas generadas en el subsistema bovinos y excretas porcinas, obtenidas en una granja cercana.

La carga del biodigestor se realiza diariamente. Las excretas producidas por los cerdos son recogidas en los corrales, y luego son mezcladas en la tanquilla de entrada del biodigestor con las aguas que se generan durante el lavado de la unidad.

### ***Consideraciones para la instalación y manejo del biodigestor plástico***

En caso de presentarse pequeñas rupturas en el polietileno, se pueden sellar con “parches” hechos con cámaras de aire (neumáticos) de llantas de carros y trozos de madera, que se fijan al interior y exterior de las bolsas, con un tornillo, dos arandelas y una tuerca, formando una especie de emparedado. Es necesario realizar una revisión periódica de los conductos y sus uniones, con el fin de evitar fugas de biogas.

Por otro lado dentro del biodigestor, sobre la fase líquida, tiende a formarse una “nata” flotante constituida por el material fibroso no digerido por las bacterias, esta fase fibrosa se resquebraja desde el exterior al hacer presión a todo lo largo de la

superficie de la bolsa, siempre y cuando a la bolsa se le haya vaciado el biogas. El rompimiento de la “nata” permite que el biogas salga libremente para ocupar el volumen restante de la bolsa.

El empleo de materiales sintéticos (polietileno, caucho, acrílico, poliuretano, PVC) en todos los conductos que entran en contacto con el biogas, evita la corrosión ocasionada por el gas en materiales metálicos.

La válvula de seguridad se instala con la tubería para la conducción del gas en declive hacia el quemador. Esto permite captar por gravedad el agua proveniente de la condensación de humedad dentro del conducto.

Debido a que el agua contenida en la válvula de seguridad se llena de algas, el recipiente debe lavarse periódicamente para facilitar la salida de biogas producido en exceso.

El biodigestor debe ser techado con materiales rústicos y de producción local (guadua, bambú, cogollo de caña, hoja de palma) para:

- ✓ Disminuir la condensación interna del vapor de agua.
- ✓ Atenuar el efecto de los rayos ultravioletas que deterioran el material (polietileno) disminuyendo su vida útil.
- ✓ Servir de barrera contra objetos que ocasionen daños al plástico.

Por otro lado, la fosa debe ser protegida con una cerca, de manera de evitar la caída accidental de personas o animales sobre el biodigestor. Además, se recomienda no sembrar árboles cerca de la fosa puesto que sus raíces pueden llegar a perforar la bolsa.

No se debe permitir la entrada al biodigestor de basuras, arena, cemento, piedras, trozos de madera, hojas o tallos de forraje y estiércol muy fibroso, puesto que dichos

materiales pueden interrumpir el libre flujo del afluyente así como disminuir la vida útil de la bolsa producto de la acumulación de sedimentos en el transcurso del tiempo. Por lo tanto es necesario colocar una trampa para sólidos o desarenador, como parte del canal de conducción de las excretas.

En ningún caso deberá cargarse el biodigestor con estiércol (seco o fresco) en cantidades excesivas sin dilución previa ya que esto aumentaría la densidad de la fase líquida formando una capa sólida (nata) en la superficie, afectando el flujo normal del sistema. En el caso de presentarse la solidificación o acumulación excesiva de sólidos en el fondo del biodigestor, estos pueden desplazarse con el uso de una manguera que conduzca agua a presión durante 2 ó 3 horas, dejando salir el efluente.

Al utilizar insecticidas, detergentes en el lavado de los alojamientos para los animales, las aguas usadas no deben ingresar al biodigestor en un período inferior a tres días después de la aplicación, para evitar el efecto nocivo de estos productos químicos sobre la vida de los microorganismos existentes.

## 5. METODOLOGÍA

La evaluación del sistema de tratamiento de efluentes provenientes de la unidad de cerdos, se desarrolla en tres fases básicamente: la primera fase consiste en caracterizar el efluente generado en la unidad de cerdos, la segunda fase en la cual se evalúa el funcionamiento del sistema de tratamiento y finalmente una tercera fase en donde se realiza el estudio económico al sistema. A continuación se presenta un esbozo de la metodología a desarrollar:

- **Primera Fase:** Caracterización del efluente proveniente de la unidad de cerdos

En esta primera fase se partió de conocer detalladamente el manejo y limpieza de los cerdos, a través de la observación diaria de la unidad porcina (una semana), de manera que permitiera definir un plan de muestreo que representara el sistema en estudio. Para conocer la unidad de cerdos se requirió dar respuesta a las siguientes preguntas: ¿cómo se realiza la limpieza de los cerdos?, ¿cuánto tiempo dura la tarea de limpieza?, ¿qué cantidad de agua se emplea en la limpieza?, ¿cuál es la frecuencia de limpieza? y ¿qué emplean en la limpieza?.

Una vez obtenida la información acerca del manejo y limpieza de la unidad porcina, se definió el plan de muestreo a la salida de la unidad, en ese plan se contempló obtener los parámetros hidráulicos, los parámetros físico-químicos así como los biológicos que permitieron caracterizar dicho efluente determinando su calidad y el grado de contaminación que acarrea su disposición directa sobre cuerpos de agua y suelos. Posteriormente estos parámetros son considerados en el cálculo de la eficiencia de remoción del biodigestor.

- **Segunda Fase:** Evaluación del funcionamiento del sistema de tratamiento

El resultado obtenido en la caracterización del efluente de la unidad de cerdos, la revisión bibliográfica acerca del sistema biodigestor-lagunas y la documentación

de experiencias con dicho sistema permitieron evaluar el funcionamiento del sistema de descontaminación. Dicha evaluación consistió en:

- a) La determinación de los parámetros de operación del sistema (tiempo de retención, carga aplicada y tasa de dilución).
- b) La caracterización de la salida del biodigestor.
- c) La caracterización de las lagunas.
- d) La determinación de la cantidad y calidad de los subproductos (biogas, bioabono y plantas acuáticas) generados a partir del sistema de descontaminación.

- ***Tercera Fase:*** Estudio económico

El estudio económico del sistema de tratamiento es de gran importancia, ya que en dicho sistema se generan subproductos que reemplazan a productos e insumos externos. El análisis económico determina el aprovechamiento de los recursos resultantes del proceso de descontaminación y la rentabilidad de la propuesta. Finalmente, se concluyó sobre la evaluación realizada al sistema de tratamiento.

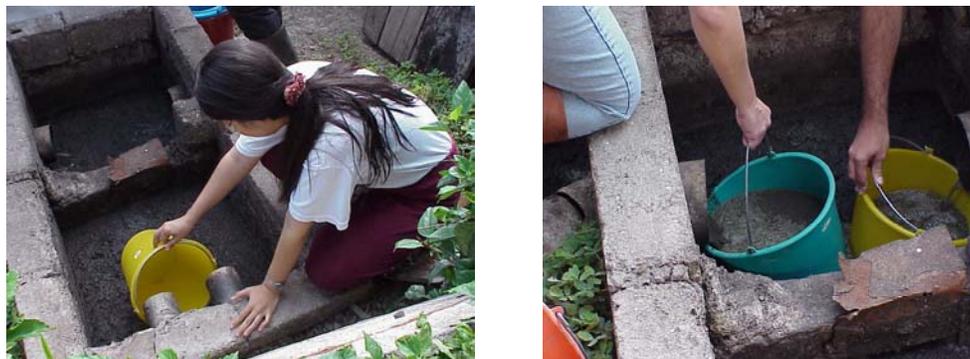
## ***5.1. CAPTACIÓN DE MUESTRAS***

Con el propósito de conocer la calidad del efluente proveniente del lavado de la unidad de cerdos, el efluente del biodigestor y lagunas se captaron muestras entre los meses de diciembre de 2001 y septiembre de 2002, con un total de cinco (5) muestreos que permitieron evaluar el sistema de tratamiento.

### ***5.1.1. Entrada al biodigestor***

En las cuatro tuberías de salida de la unidad de cerdos las cuales llegan a las dos tanquillas de entrada al biodigestor como se observa en la Figura N°5.1, se captaron sub-muestras durante el período de lavado, las cuales se recolectaron en un recipiente de 150 litros. Al final del mismo se realizó una mezcla de todas las sub-muestras acumuladas con las excretas recolectadas en la unidad, tal como se aprecia

en la Figura N°5.2. Este procedimiento tuvo por objeto obtener una muestra representativa del afluente o entrada al sistema de tratamiento.



**Figura N°5.1:** Captación del efluente de la unidad de cerdos

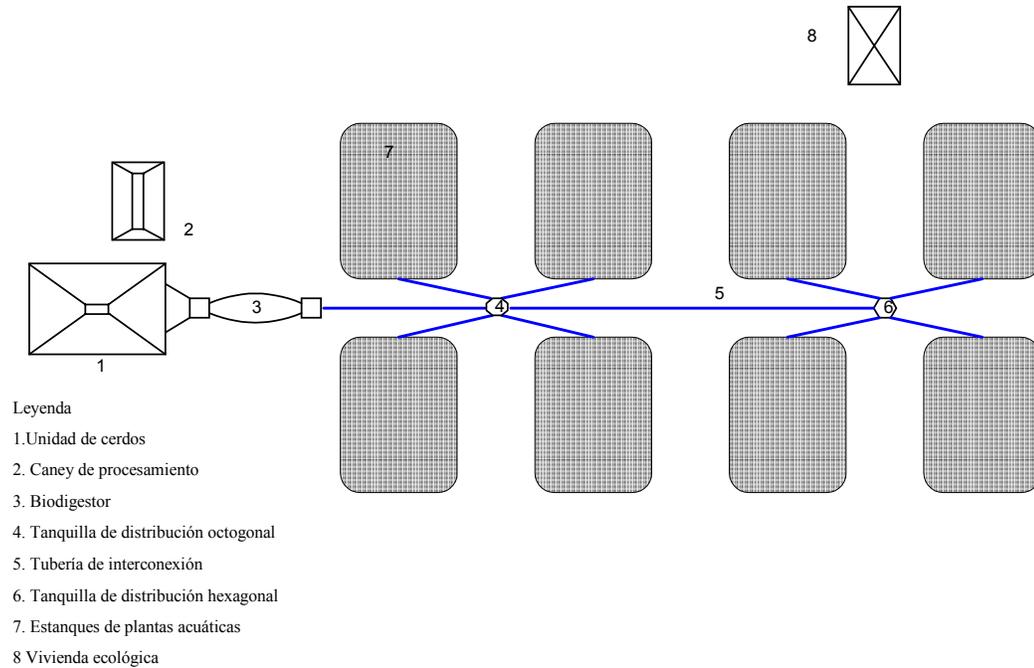


**Figura N°5.2:** Mezclado del agua de lavado con excretas

### **5.1.2. Salida del biodigestor**

Una vez transcurrido el tiempo de retención hidráulica del biodigestor (tiempo de permanencia de la carga orgánica en el digestor) se captó una muestra instantánea en la tanquilla octogonal que se encuentra a la salida del mismo, como se observa en la Figuras N°5.3 y 5.4. El tiempo de retención hidráulica se calcula dividiendo el volumen de biodigestión entre el caudal de líquido residual. La determinación del

volumen de biodigestión se encuentra en el Anexo II: Cálculo del Volumen del Biodigestor.



**Fuente:** Pérez *et al*, 2002.

**Figura N°5.3:** Croquis de la red de distribución de efluentes en el Modelo Físico de ATS



**Figura N°5.4:** Tanquilla octogonal

### **5.1.3. Lagunas**

En cada visita a la granja experimental se captaron muestras en diferentes lagunas, verificando que las muestras procedieran de lagunas con mayor tiempo de haber sido cargadas. Así mismo, lagunas cuya cosecha de plantas se haya empleado para ese momento.

### **5.1.4. Biogas**

Con el uso de un recolector de gas (pepino) y una bomba de vacío se atrapó una muestra del biogas generado a partir del proceso de digestión anaerobia, en la tubería de salida como se aprecia en la Figura N°5.5.



**Figura N°5.5:** Captación del biogas

## **5.2. DETERMINACIÓN DEL CAUDAL DE LÍQUIDO**

Para determinar el caudal de entrada y salida del biodigestor se empleó la siguiente metodología:

En la determinación del caudal del líquido residual de la granja de cerdos se empleó un recipiente aforado de 120 litros al cual se le determinó el tiempo de llenado y con esa relación se cuantificó el volumen de agua gastado durante el lavado.

Por otra parte para conocer el volumen de excretas se recolectaron éstas en un recipiente de 20 litros, luego se vaciaron en el envase de 150 litros para la preparación de la muestra compuesta del afluente al biodigestor. Conocido la altura de las excretas en el balde, se agregó agua hasta alcanzar dicha altura y seguidamente se vaciaba en un cilindro graduado de un 1 litro determinándose así el volumen de excretas. El volumen de agua gastado más el volumen de excretas recolectado en la unidad de cerdos en un día representa el caudal de líquido residual.

### ***5.3. DETERMINACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGAS***

Luego de vaciar el biogas proveniente del biodigestor, quemándose el gas, se tomó el tiempo de llenado del biodigestor, estimándose 48 a 72 horas aproximadamente, reconociéndose que la bolsa se había llenado al empezar a burbujear el líquido de la válvula de seguridad. Se verificó el volumen del biodigestor en  $36,4 \text{ m}^3$ , en donde un 47% corresponde a la fase gaseosa, en esta determinación se empleó las dimensiones como se aprecia en el Anexo II. En consecuencia el caudal de biogas se calculó al dividir el volumen gaseoso entre el tiempo de llenado del biodigestor.

### ***5.4. ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICO***

Entre los subproductos obtenidos a raíz del sistema de tratamiento se encuentran las aguas residuales, el biogas y las plantas acuáticas. A continuación se exponen los pasos seguidos en el análisis físico-químico de cada uno de los subproductos.

### 5.4.1. Análisis de aguas

Se determinaron las características físico – químicas al afluente y efluente del biodigestor y lagunas las cuales permitieron evaluar la calidad del desecho, mediante el análisis a las muestras captadas se determinó una serie de parámetros que permitieron conocer el contenido de materia orgánica carbonácea y nitrogenada, la fracción biodegradable y el contenido de nutrientes.

Existen parámetros que son inestables a corto plazo estos fueron determinados en el sitio de captación. Las muestras de aguas recolectadas se analizaron en el Laboratorio de la Planta Experimental de Tratamiento de Aguas (PETA) de la UCV. Los métodos de análisis usados para estas determinaciones están basados en los presentados en el Standard Method for the Examination of Water and Wastewater (1998).

#### 5.4.1.1. Análisis in situ

A cada muestra de agua captada se le determinó en sitio: pH, Conductividad, Alcalinidad, Temperatura y Sólidos Sedimentables, tal como se aprecia en la Figura N°5.6.



**Figura N°5.6:** Análisis in situ

#### 5.4.1.2. Análisis en el laboratorio

A cada una de las muestras captadas se les realizaron los siguientes análisis:

- ✓ *Sólidos*: Total a 103°C, Total Fijo a 550°C, Total Volátil a 550°C, Disuelto Total a 103°C, Disuelto Fijo a 550°C, Disuelto Volátil a 550°C, Suspendido Total a 103°C, Suspendido Fijo a 550°C y Suspendido Volátil a 550°C.
- ✓ DBO<sub>5,20</sub> y DQO
- ✓ Demanda Última carbonácea de Oxígeno (L), Demanda Última de Oxígeno Total (DeT) y Constantes de Velocidad de oxidación:  $k_{10}$  y  $k_{OT}$ .
- ✓ *Nitrógeno*: en sus diferentes formas.
- ✓ *Fósforo*: en sus diferentes formas.

La determinación de la demanda última de primera etapa ó demanda carbonácea de oxígeno (L), la demanda última de oxígeno total (DeT) y las constantes de oxidación: Total ( $k_T$ ) y carbonácea ( $k_{10}$ ), es necesaria para conocer el efecto de la disposición de los efluentes a cuerpos de agua, así como para conocer el funcionamiento de las instalaciones de tratamiento. La diferencia entre L y DeT radica en la magnitud de la demanda, pues la primera es el oxígeno requerido para estabilizar la materia orgánica carbonácea, mientras la otra es el oxígeno necesario para estabilizar la materia carbonácea y nitrogenada. Las constantes indican la facilidad de biodegradación, en cada caso. Estos parámetros se obtuvieron mediante la generación de una serie de datos progresivos de DBO, determinados a intervalos de un día, durante un período de incubación comprendido de uno (1) a veinte (20) días.

La demanda de oxígeno tanto carbonácea como nitrogenada son definidas eliminando la nitrificación en una de las dos muestras instantáneas preparadas para la incubación a través del uso de un inhibidor. En las muestras donde se elimina la nitrificación, sólo la demanda carbonácea de oxígeno permanece. El inhibidor empleado en la preparación de las muestras en la que sólo se deseaba conocer L es 2-dicloro-metil piridina. En la obtención de dichos parámetros se emplearon los siguientes métodos numéricos: Fujimoto, Thomas y Mínimos Cuadrados, los cuales

se desarrollaron a través del uso de EXCEL<sup>®</sup>, con el procedimiento señalado en Metcalf and Eddy, 1985. Para la selección del valor más preciso se escogió la mayor correlación; estos resultados se presentan en el Anexo I.

En el análisis de la entrada al biodigestor se consideran los aportes volumétricos unitarios por cerdo, estos se determinaron como el producto del parámetro físico-químico en cuestión y el caudal de líquido residual, para luego dividirlo entre la población de cerdos.

En la Tabla N°5.1 se muestra la metodología analítica empleada en la determinación de los parámetros físico-químicos, según lo establecido en Standard Methods for Examination of Water and Wastewater.

**Tabla N° 5.1:** Metodología Analítica empleada para determinar los parámetros de caracterización de efluentes de granjas porcinas

| PARÁMETROS   | MÉTODO ANALÍTICO                                     |
|--|--|
| Temperatura  | Termómetro (2550)                                    |
| pH   | Potenciométrico (4500-H <sup>+</sup> )               |
| Oxígeno Disuelto                                   | Potenciométrico (4500-0)                             |
| Sólidos Sedimentables                              | Volumétrico (2540- F)                                |
| Sólidos Totales, Disueltos, Fijos y Volátiles      | Gravimétrico (2540,B,B', C, E)                       |
| Demanda Química de Oxígeno, DQO                    | Reflujo abierto (5220-B)<br>Reflujo cerrado (5220-C) |
| Demanda Bioquímica de Oxígeno, DBO <sub>5,20</sub> | Diluciones (5210-B)                                  |
| Fósforo  | (4500P-E)  |
| Fosfatos   | (4110-B)   |
| Nitrógeno: Orgánico y Amoniacal                    | Macro – Kjeldahl – Titulación (4500-B, C)            |
| Nitrito, Nitrato                                   | (4110-B)   |

**Fuente:** Standard Methods for Examination of Water and Wastewater, 1998.

#### **5.4.2. Análisis bacteriológico**

Para la determinación de organismos coliformes en las muestras del afluente y efluente del biodigestor así como las lagunas, se siguió la metodología especificada en el Standard Methods for Examination of Water and Wastewater, en las secciones 9222 B 2b, medio endo (coliformes totales) y 9222 D1 medio M-FC (coliformes fecales). Este análisis se realizó en el Laboratorio de Biología de la Planta Experimental de Tratamiento de Aguas (PETA) de la UCV.

#### **5.4.3. Análisis del biogas**

Para el análisis de la muestra de biogas se contó con la colaboración del Laboratorio de Calidad de Gas perteneciente a INTEVEP y el Laboratorio Corporativo de Empresas POLAR. En dicho análisis se utilizó un cromatógrafo el cual reportó composición de CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O.

En el Laboratorio de Calidad de Gas se empleó análisis de gas de refinería con columnas capilares y empacadas. En el Laboratorio Corporativo de Empresas POLAR, se operó el CG-MSD con la columna Suel-Q Plot. La técnica de inyección de muestra fue del headspace (gas) de la muestra a temperatura ambiente. Para trabajar con el CG-MSD se hizo bajo las siguientes condiciones:

- Detector: Modo: SCAN (3-44 m/z), EM volt: rel 1576, Gas: He, Temperatura de la línea de transferencia: 280°C.
- Inyector: Split/Splitless, Temperatura: 250°C, Modo: Splitless, flujo de purga: 20 mL/min, tiempo de purga: 2 min, presión: 0.59 psi.
- Columna: Suel-Q Plot de 0.32 mm ID, presión: 0.59 psi (constante), flujo inicial: 1.3 mL/min, velocidad promedio: 41 cm/s.
- Horno: Temperatura inicial: 45°C por 5 min.

En la determinación del sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ) se empleó una ampolla GASTEC, que registra la concentración de  $H_2S$  en ppm como lo muestra la Figura N°5.7, esta medición se hace en el sitio, ya que la molécula de  $H_2S$  es inestable, es decir, se convierte con facilidad en diversos compuestos azufrados.



**Figura N°5.7:** Determinación de sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ )

#### ***5.4.4. Análisis de las plantas acuáticas***

Los análisis de las plantas acuáticas fueron facilitados por el Programa de Agricultura Tropical Sostenible ATS, quienes captaron submuestras para preparar una muestra compuesta de las plantas cosechadas, que luego serían analizadas en el Laboratorio de Nutrición Animal del Instituto de Producción Animal de la Facultad de Agronomía de la UCV, Maracay.

A las muestras compuestas se le determinó su calidad en cuanto a composición en porcentaje de: Materia Seca (MS), Ceniza, Proteína Cruda (PC), Fibra Cruda, Extracto Etéreo, Fibra Detergente Neutro (FDN), Calcio, Fósforo y Energía Bruta (EM).

### ***5.5. ANÁLISIS ECONÓMICO***

Por medio del análisis de los ingresos, egresos y ahorro por los productos reutilizados, como biogas y plantas acuáticas, se realizó un estudio de la rentabilidad del sistema de tratamiento integrado, a través de un flujo de caja, determinándose los índices económicos: Valor Presente (VP) y Tasa Interna de Retorno (TIR) considerándose la capacidad de la granja.

Se realizaron tres flujos de caja con un tiempo de operación de 20 años, empleando datos actuales de la granja. Con el primer flujo de caja se determinó la rentabilidad del proyecto propuesto, en el segundo se halló el número mínimo de cerdos para el cual se hace rentable dicha propuesta y con el último se determinó la factibilidad económica de una granja convencional de cerdos.

En el presente estudio se realizaron suposiciones y consideraciones referentes a los flujos de caja, las cuales se plantean en el siguiente capítulo para una mejor comprensión del análisis económico.

## **6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

En el siguiente capítulo se presentan los resultados que permiten evaluar la alternativa de producción de cerdos bajo el enfoque de tratamiento y aprovechamiento de los efluentes generados en la granja. Para una mejor comprensión de dichos resultados se presentarán de la siguiente manera:

- *Caracterización de la población de cerdos*: dicha descripción permite conocer la operación y manejo de la granja lo cual incide en la calidad del desecho generado.
- *Cuantificación hidráulica*: en donde se determinan los parámetros de operación estos describen el ejercicio del sistema de tratamiento.
- *Caracterización físico-química del afluente y efluente del biodigestor y lagunas*: tiene por objeto definir la calidad de estos líquidos residuales, su variabilidad en el tiempo y así cuantificar la eficiencia del sistema de tratamiento.
- *Evaluación de los subproductos (biogas, bioabono y plantas acuáticas) generados a partir del sistema de tratamiento*: esta evaluación contribuye en la determinación del funcionamiento de dicho sistema, así mismo, se analiza la incidencia de tales recursos sobre el sistema de producción propuesto.
- *Estudio económico*: el cual define la rentabilidad del sistema de producción.

### **6.1. CARACTERIZACIÓN DE LA POBLACIÓN DE CERDOS**

En la granja porcina del Modelo Físico se realiza la producción y reproducción de cerdos, encontrando: un semental, cerdas, lechones, destetes y cerdos de engorde (crecimiento y finalización).

El número de animales fue variable como se puede apreciar en la Tabla N°6.1, y pequeño comparado con la capacidad de la granja (130 animales), lo cual se debe a la disminución de la reproducción. Hasta el mes de febrero se tenían dos verracos en la unidad, uno en activa reproducción mientras que el otro se preparaba para

reemplazar al primero. En tanto que el verraco viejo cumplió cuatro años en la granja al inicio del presente año, tiempo que se considera recomendable su reemplazo por la baja efectividad de monta y reproducción. Otro factor que intervino en el número de cerdos presentes fue la venta anticipada de los lechones y destetes, trayendo como consecuencia la poca existencia de cerdos de ceba o finalización en la granja.

En el mes de enero se maneja el mayor número de animales como se observa en la Tabla N°6.1, constituidos en su mayoría por destetes los cuales no se desarrollaron para la ceba, esto se evidencia al siguiente mes en donde tan sólo se dispone de dos cerdos de ceba. En marzo comienza la monta del verraco nuevo, lo cual justifica la baja o nula existencia de lechones en los meses de abril a junio, ya que la gestación tiene una duración de 114 a 120 días, mientras que en el mes de septiembre se presenta la mayor cantidad de lechones en comparación a los restantes muestreos, ya que para ese momento ha transcurrido el período de gestación de las madres.

**Tabla N°6.1:** Distribución de la población de cerdos

| N° de cerdos | Muestreo  |           |           |           |           |           |
|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|              | 06/12/01  | 26/01/02  | 23/02/02  | 27/04/02  | 29/06/02  | 04/09/02  |
| Padrote      | 2         | 2         | 2         | 1         | 1         | 1         |
| Cerdas       | 6         | 9         | 8         | 10        | 10        | 9         |
| Lechones     | 10        | 15        | -         | -         | -         | 22        |
| Destetes     | -         | 21        | 25        | -         | 10        | 16        |
| Ceba         | 15        | 3         | 2         | 9         | -         | -         |
| <b>Total</b> | <b>33</b> | <b>50</b> | <b>37</b> | <b>20</b> | <b>21</b> | <b>48</b> |

Por otra parte en la Tabla N°6.2 se presentan los pesos aportados por los diferentes cerdos; se aprecia en dicha tabla que para el mes de diciembre se tiene el máximo valor de peso total en comparación al resto de los ensayos realizados, esto se

justifica ya que para ese momento se contaba con el mayor número de animales de ceba como se observa en la Tabla N°6.1, seguido del mes de abril donde se contabilizan nueve animales para la ceba. Mientras que en junio se obtiene el mínimo peso total, para ese mes se disponía de pocos animales con ausencia de cerdos de finalización.

El peso del padrote es prácticamente constante hasta que se reemplaza como se percibe en la Tabla N°6.2. Las cerdas aportan un peso total medianamente constante a excepción del mes de diciembre donde se cuenta con sólo seis madres. Así mismo, el peso total de los destetes se mantiene exceptuando junio con el menor número de animales de esta clase. Las cerdas por su parte constituyen el mayor aporte de peso.

**Tabla N°6.2:** Distribución de pesos de los cerdos

| Peso (kg)    | Muestreo       |                |             |               |               |               |
|--------------|----------------|----------------|-------------|---------------|---------------|---------------|
|              | 06/12/01       | 26/01/02       | 23/02/02    | 27/04/02      | 29/06/02      | 04/09/02      |
| Padrote      | 389,5          | 412            | 424         | 178           | 178           | 220           |
| Cerdas       | 966,5          | 1311           | 1177,5      | 1588          | 1428,5        | 1330,5        |
| Lechones     | 33,35          | 33             | -           | -             | -             | 108,2         |
| Destetes     | -              | 221,35         | 289,5       | -             | 54,9          | 299,5         |
| Ceba         | 913,5          | 205            | 178         | 433,5         | -             | -             |
| <b>Total</b> | <b>2302,85</b> | <b>2182,35</b> | <b>2069</b> | <b>2199,5</b> | <b>1661,4</b> | <b>1958,2</b> |

La alimentación de los animales desde la etapa de crecimiento se basa en una dieta balanceada compuesta por jugo de caña y aceite de palma africana (ACPA) como fuentes de energía, mientras que la fuente de proteína la constituyen las plantas acuáticas *Azolla* y *Lemna*, grano de soya integral y una mezcla de vitaminas y minerales. En la Tabla N°6.3 se observa la variación de la cantidad suministrada de

cada uno de estos elementos de acuerdo a la población de cerdos manejada para la fecha.

**Tabla N°6.3:** Dieta del Modelo Físico

|  | Muestreo |      |          |          |          |          |
|--|----------|------|----------|----------|----------|----------|
|  | 06/12/01 |      | 23/02/02 | 27/04/02 | 29/06/02 | 04/09/02 |
| <b>Grano de soya (Kg)</b>                  | 21       | 23,4 | 8,4      | 11,7     | 2,7      | 7,8      |
| <b>Vit-minerales (Kg)</b>                  | 4,6      | -    | 2,83     | 4,25     | 2,75     | 0,1      |
| <b>Azolla – Lemna (Kg)</b>                 | 147      | 66   | 74       | 129      | -        | 60       |
| <b>Jugo de caña y/o suero de leche (l)</b> | 310      | 177  | 205,6    | 202,2    | 122,5    | 188,0    |
| <b>Iniciador (Kg)</b>                      | -        | 23   | 35       | -        | 14       | 12,4     |
| <b>ACPA (Kg)</b>                           | 0,6      | 0,6  | -        | -        | -        | 0,6      |

Al observar la Tabla N°6.3 se aprecia que en el mes de diciembre se emplea la mayor cantidad de vitaminas y minerales, plantas acuáticas y jugo de caña, como se mencionó es en dicho mes donde se tiene el mayor número de animales de ceba cuya dieta suministrada corresponde a la diseñada en el Modelo Físico. El gasto en dichos alimentos es seguido por el mes de abril en donde se contabilizaron nueve animales de finalización. En cuanto al grano de soya se consume más en los meses de diciembre y enero, en este último se suman tres cerdas para la reproducción.

El iniciador es el alimento suministrado a los cerdos de destetes, su consumo es máximo en febrero donde se reporta el mayor número de estos animales, continuado por enero. Mientras que en junio con diez destetes el gasto en iniciador es menor. En diciembre y abril no se tienen cerdos destetados.

En junio la cosecha de plantas acuáticas decreció por lo que se decidió alimentar los cerdos con concentrado comercial; es por ello el nulo consumo de dichas plantas para este mes, así mismo el bajo consumo de grano de soya y jugo de caña. En septiembre se suministra menos plantas acuáticas ya que en dicho mes no habían cerdos de finalización.

## **6.2. CUANTIFICACIÓN HIDRÁULICA**

La carga aplicada al biodigestor representa un parámetro de operación importante, éste incide en el funcionamiento y eficiencia del digestor ya que el mismo determina la producción de biogas.

El biodigestor fue diseñado para una carga diaria proveniente de 131 animales, distribuidos en diez cerdas, un padrote, cuarenta cerdos de ceba y ochenta lechones, los cuales aportan una carga total de 52 Kg de excretas, considerando que un cerdo con 100 kg PV excreta 0,75 kg diariamente. Sin embargo, la masa de excretas promedio con la cual trabaja el biodigestor actualmente corresponde a 14 kg como se aprecia en la Tabla N°6.4, existiendo un déficit del 73% de excretas para el cual el biodigestor fue diseñado.

Para el mes de septiembre se recolectaron la mayor cantidad de excretas, esto se debe al predominio de lechones y destetes, ya que la tasa de excreción diaria para estos animales es superior a la de los restantes cerdos, además, en dicha fecha se dispone de 48 cerdos casi el mayor número de animales manejado dentro de los muestreos realizados, mientras que en enero con 50 animales sólo se recogieron 11 Kg de excretas, la diferencia en la masa de excretas recolectadas se refleja principalmente en el número de lechones para cada ensayo.

Por otra parte, el caudal de entrada como se observa en la Tabla N°6.4 se mantiene en el orden a lo largo de la evaluación con un promedio de 237 litros/día. El

caudal mínimo corresponde al mes de junio donde tan sólo se recogen 10 Kg de excretas y se gasta 180 litros de agua.

**Tabla N°6.4:** Parámetros de operación

| Parámetro de operación                           | Muestreo |          |          |          |          | Promedio      |
|--|----------|----------|----------|----------|----------|---------------|
|  | 26/01/02 | 23/02/02 | 27/04/02 | 29/06/02 | 04/09/02 |               |
| <b>Volumen diario de excretas<br/>(l)</b>        | 12,0     | 14,5     | 12,0     | 10,0     | 20,0     | <b>13,7</b>   |
| <b>Gasto de agua<br/>(l/día)</b>                 | 202      | 271      | 266      | 180      | 199      | <b>224</b>    |
| <b>Caudal de entrada<br/>(l/día)</b>             | 214      | 284      | 278      | 190      | 219      | <b>237</b>    |
| <b>Peso de excretas<br/>(Kg)</b>                 | 11       | 14       | 14       | 10       | 21       | <b>14</b>     |
| <b>Tasa de dilución<br/>(l agua/kg excretas)</b> | 18,4     | 19,3     | 19,0     | 18,0     | 9,5      | <b>16,8</b>   |
| <b>Producción de excretas<br/>Por 100 Kg PV</b>  | 0,50     | 0,68     | 0,64     | 0,60     | 1,07     | <b>0,70</b>   |
| <b>Tiempo de lavado</b>                          | 13'01"   | 11'      | 8'27"    | 10'38"   | 8'26"    | <b>10'46"</b> |
| <b>Tiempo de retención hidráulico<br/>(días)</b> | 91       | 69       | 70       | 102      | 89       | <b>84</b>     |
| <b>N° de cerdos</b>                              | 50       | 37       | 20       | 21       | 46       | <b>35</b>     |

Otra variable estimada en el diseño del biodigestor es la tasa dilución la cual expresa la cantidad de agua que se utilizará para diluir un 1 Kg de estiércol a descontaminar. Para zona caliente (más de 24°C) se recomienda una dilución de 10 litros de agua/Kg de excreta [Ediciones CENDIGRANJA, 1999]. No obstante, en el biodigestor en estudio resulta una dilución equivalente a 17 litros de agua/Kg de

excreta, tal como se presenta en la Tabla N°6.4, lo que refleja una mayor dilución a la sugerida, a excepción del mes de septiembre donde se reportó un menor gasto de agua. Sin embargo, la tasa de dilución considerada en el diseño del biodigestor para un tiempo de retención de 28 días es aproximadamente 17 litros de agua/kg de estiércol coincidiendo con la tasa de dilución manejada actualmente en la granja. La dilución previa de la carga al biodigestor es esencial ya que evita la solidificación dentro del mismo, lo cual interrumpiría el proceso.

La producción de excretas por 100 Kg PV es mínima en el mes de enero y máxima en septiembre donde la población de cerdos está constituida en su mayoría por lechones y destetes.

El tiempo mínimo de lavado se obtuvo para el muestreo de septiembre ya que en la unidad se encontraban animales de menor tamaño en comparación a enero donde el tiempo es mayor debido a que en dicho mes habían más animales adultos.

El tiempo de retención es un parámetro muy importante, el mismo define el tiempo mínimo en días que la carga orgánica debe permanecer dentro del biodigestor para que sea degradada por los microorganismos. Los tiempos de retención calculados resultaron elevados en comparación al tiempo de retención de diseño en donde se habla de 28 días de retención. Estos resultados son consecuencia de la baja carga aplicada al biodigestor y del gasto de agua. Como se aprecia en la Tabla N°6.4 en el mes de junio el tiempo de retención hidráulico es el más alto, esto se debe a la baja cantidad de excretas disponible para ese mes. Mientras que en febrero y abril la retención es menor producto de las excretas generadas en esas fechas y del gasto de agua. Si se subestima este parámetro, implica que la partícula de excreta recorre muy rápidamente la trayectoria del biodigestor, por lo que el proceso de descontaminación es deficiente y disminuye la producción de metano.

### **6.3. CARACTERIZACIÓN FÍSICO – QUÍMICA**

La determinación de las características físico – químicas de los efluentes líquidos de granjas porcinas han permitido clasificarlos como altamente agresivos. A continuación se presentan los parámetros que se determinaron para conocer la calidad del afluente y efluente del biodigestor y lagunas.

#### **6.3.1. Afluente o entrada del biodigestor**

El lavado de los corrales de la granja porcina arrastra excretas (heces y orina), restos de alimentos (jugo de caña, grano de soya, plantas acuáticas e iniciador) que representan los componentes del efluente de dicha granja. En la Tabla N°6.5 se reportan los diferentes parámetros físico-químicos que permiten caracterizar al efluente proveniente de la unidad de cerdos.

En el análisis del afluente es conveniente señalar que para los tres primeros muestreos la preparación de las muestras en el momento de sus captaciones fue diferente a los meses de junio y septiembre, estos últimos representan significativamente el afluente, ya que se mezcló el agua de lavado con las excretas recolectadas. Sin embargo, los valores de DBO y DQO para los meses de enero, febrero y abril se ajustaron a los meses de junio y septiembre a través de un balance de masa en DBO, de tal manera que se puede comparar estos parámetros con libertad.

El proceso de digestión anaerobia depende del pH, temperatura, disponibilidad de nutrientes, tiempo de retención y nivel de carga como se señaló en el marco teórico. El pH obtenido varió de 6,2 a 7,1 en el transcurso de la evaluación como se percibe en la Tabla 6.5, dichos valores se encuentran en el rango favorable para la existencia y actividad de los microorganismos en los sistemas de tratamiento biológicos.

Tabla N°6.5: Parámetros físico-químicos del afluente o entrada al biodigestor

| Parámetros                            | Muestreo     |              |              |              |              | Promedio                 |
|---------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------------------|
|                                       | 26/01/02     | 23/02/02     | 27/04/02     | 29/06/02     | 04/09/02     |                          |
| pH                                    | 7,1          | 6,7          | 6,6          | 6,8          | 6,2          | <b>6,6<sup>(*)</sup></b> |
| Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /l) | 2500         | 1500         | 1800         | 1480         | 2340         | <b>1924</b>              |
| Temperatura (°C)                      | 26           | 28           | 27           | 28           | 30           | <b>28</b>                |
| Conductividad (µS/cm)                 | 7100         | 5290         | 5830         | 5000         | 8630         | <b>6370</b>              |
| Oxígeno disuelto (mg/l)               | 0,4          | 0,6          | 1,0          | 0,6          | 0            | <b>0,5</b>               |
| DBO <sub>5,20</sub> (mg/l)            | 8038         | 12715        | 9673         | 12600        | 17850        | <b>12175</b>             |
| DQO (mg/l)                            | 24389        | 45495        | 28376        | 46000        | 68573        | <b>42567</b>             |
| DBO/ DQO (adimensional)               | 0,33         | 0,28         | 0,34         | 0,27         | 0,26         | <b>0,30</b>              |
| Sólidos (mg/l)                        |              |              |              |              |              |                          |
| <b>Total</b>                          | <b>40234</b> | <b>12378</b> | <b>16278</b> | <b>43150</b> | <b>53000</b> | <b>33008</b>             |
| <b>Fijo</b>                           | <b>10113</b> | <b>3266</b>  | <b>4485</b>  | <b>6978</b>  | <b>11140</b> | <b>7196</b>              |
| <b>Volátil</b>                        | <b>30121</b> | <b>9111</b>  | <b>11793</b> | <b>36172</b> | <b>41860</b> | <b>25812</b>             |
| <b>Disuelto total</b>                 | <b>4456</b>  | <b>3804</b>  | <b>5055</b>  | <b>4160</b>  | <b>8436</b>  | <b>5182</b>              |
| <b>Fijo</b>                           | <b>2828</b>  | <b>2020</b>  | <b>2790</b>  | <b>2432</b>  | <b>4924</b>  | <b>2999</b>              |
| <b>Volátil</b>                        | <b>1628</b>  | <b>1784</b>  | <b>2264</b>  | <b>1728</b>  | <b>3512</b>  | <b>2183</b>              |
| <b>Suspendido total</b>               | <b>35778</b> | <b>8574</b>  | <b>11223</b> | <b>38990</b> | <b>44564</b> | <b>27826</b>             |
| <b>Fijo</b>                           | <b>7285</b>  | <b>1246</b>  | <b>1694</b>  | <b>4546</b>  | <b>6216</b>  | <b>4197</b>              |
| <b>Volátil</b>                        | <b>28493</b> | <b>7327</b>  | <b>9529</b>  | <b>34444</b> | <b>38348</b> | <b>23628</b>             |
| Sólidos sedimentables (ml/l)          | 306          | 121          | 261          | 375          | NS           | <b>413</b>               |
| Nitrógeno NTK (mg N/l)                | 1221         | 1476         | 1658         | 1316         | 1484         | <b>1431</b>              |
| <b>Amoniacal</b>                      | <b>437</b>   | <b>336</b>   | <b>594</b>   | <b>532</b>   | <b>588</b>   | <b>497</b>               |
| <b>Orgánico</b>                       | <b>784</b>   | <b>1140</b>  | <b>1064</b>  | <b>784</b>   | <b>896</b>   | <b>934</b>               |
| Nitrito (mg N/l)                      | 0            | 0            | 0            | 0            | 0            | <b>0</b>                 |
| Nitrato (mg N/l)                      | 0,23         | 0            | 0            | 0,35         | 0            | <b>0,12</b>              |
| Fósforo total (mg P/l)                | 269          | 398          | 189          | 284          | 490          | <b>326</b>               |
| Ortofosfato (mg P/l)                  | 66           | 66           | 84           | 200          | 384          | <b>160</b>               |
| Cloruro (mg/l)                        | 606          | 427          | 462          | 348          | 735          | <b>516</b>               |
| Sulfato (mg/l)                        | 227          | 184          | 285          | 129          | 130          | <b>191</b>               |

(\*)El pH promedio se determinó como el  $-\log \Sigma[H^+]/N^\circ$  de muestreos

ND: No se apreció sedimentación

La alcalinidad se sitúo entre 1480 y 2500 mg/l. Una disminución del pH pone en peligro la existencia de las bacterias, en tanto que la alcalinidad obtenida tiene la propiedad de contrarrestar el efecto de los ácidos formados durante la digestión anaerobia sobre el pH. La alcalinidad de un agua residual representa la presencia de hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos de elementos como el calcio, magnesio, sodio, potasio o amoníaco. El agua residual es generalmente alcalina, recibiendo su alcalinidad del agua de suministro, y de materias añadidas como por ejemplo, la cal empleada en los suelos de los paritorios para desinfectarlos, aunque en mínima cantidad es un aporte a dicho parámetro.

Los microorganismos tienen un nivel óptimo de crecimiento y un metabolismo dentro de un rango de temperatura bien definido como se explica en el marco teórico, de allí la importancia de este parámetro. La temperatura de los efluentes de la granja se encuentra entre 26 y 30°C, dicha temperatura se encuentra en el primer rango (mesofílico) considerado favorable para la vida y crecimiento de las bacterias anaerobias. La temperatura no representa una perturbación para el biodigestor, ya que la misma se mantiene gracias a las condiciones tropicales presentes.

La conductividad viene determinada por la presencia de sales en el líquido residual. Los sólidos disueltos indican la existencia de compuestos inorgánicos e iones en el afluente, estos sólidos alcanzaron una concentración promedio de 5182 mg/l. Además se cuantificó sulfato y cloruro como se aprecia en la Tabla N°6.5, lo cual contribuye con la conductividad de dicho afluente.

El líquido residual procedente de la unidad de cerdos, presentó una calidad variable para cada muestreo, como se observa en la Tabla N° 6.5. La  $DBO_{5,20}$  promedio resultó 12175 mg/l, representando una alta concentración de materia orgánica biodegradable, lo que pone de manifiesto la agresividad de estos desechos. Las variaciones para cada ensayo se atribuyen a diferencias en el manejo de los

animales, en cuanto a la distribución y cantidad de cerdos, lo cual repercute en el suministro de alimentos (cantidad y calidad), la cantidad de excretas, el agua empleada y en consecuencia en la calidad del desecho generado.

La baja ingestión y asimilación de los alimentos por parte de los cerdos representa otro factor que incide en la cuantificación de los parámetros físico-químicos, ya que al no procesarse eficientemente los alimentos por parte de los cerdos se desecharán representando mayor carga orgánica; dicho parámetro no se evaluó en el presente trabajo, el está asociado al metabolismo de los cerdos, sus requerimientos alimenticios, entre otros.

En el mes de septiembre se alcanza la mayor  $DBO_{5,20}$  como se observa en la Tabla N°6.5, ya que en dicho mes se recolectaron la mayor cantidad de excretas en la unidad de cerdos; mientras que la  $DBO_{5,20}$  más pequeña resultó en el muestreo de enero donde tan sólo se recogen 11 Kg de excretas, sin embargo, en este mes se suministró mayor cantidad de alimentos en comparación a septiembre. Otro parámetro considerable en el análisis de la  $DBO_{5,20}$  es la tasa de dilución antes mencionada, para septiembre la dilución fue la más baja de los cinco ensayos realizados, lo cual repercute en la concentración obtenida.

Comparando febrero con abril, en febrero resultó una mayor  $DBO_{5,20}$  a pesar que para ambos muestreos se recolectaron igual cantidad de excretas y se empleó la misma tasa de dilución. Sin embargo, el suministro de alimentos es diferente, reflejándose en el uso de iniciador en febrero. La  $DBO_{5,20}$  de junio es superior a la de abril a pesar de que en abril se obtienen más excretas, pero en este último no se empleó iniciador y además la tasa de dilución es mayor que la de junio.

La DQO mide la cantidad total de oxígeno necesario para oxidar tanto la materia biodegradable como el resto de la materia orgánica que puede ser oxidada químicamente. En el afluente la DQO representa de tres a cuatro veces la DBO, lo

que manifiesta la presencia de elementos oxidables químicamente, como la fibra, la lignina (aunque esta última es difícil de oxidar), entre otros elementos presentes en la dieta de los cerdos. La DQO obtenida afecta la relación DBO/DQO (grado de biodegradación), resultando baja con un promedio de 0,3, sin embargo, la DBO se situó entre 8038 y 17850 mg/l, valores que manifiestan la condición de biodegradabilidad del afluente.

Por otro lado, en aguas residuales de granjas porcinas la DQO se aproxima a las concentraciones de los Sólidos Totales (STT) en las excretas frescas de cerdo, esto se evidencia en los muestreos de junio y septiembre como se aprecia en la Tabla N°6.5; en junio se alcanzó 46000 mg/l en DQO y 43150 mg/l en STT.

Comparando los Sólidos Totales (STT) de enero con los de febrero se tienen que los del primer mes son mayores, ya que se dispone de cincuenta animales. Los STT de abril son superiores a los de febrero, en abril se tiene nueve animales de ceba que requieren de más alimentos, lo que incrementa los sólidos en el líquido residual. Los STT de junio son inferiores a los de septiembre, esta diferencia se atribuye a la población manejada para cada muestreo, la cual repercute en la cantidad de alimento suministrado y las excretas recolectadas.

Para una mejor comprensión de los sólidos presentes en el afluente, estos se analizan a través de su distribución porcentual como se observa en la Tabla N°6.6.

El origen orgánico del efluente de la granja justifica la alta concentración de Sólidos Volátiles Totales (SVT) encontrada con un promedio de 25812 mg/l. Los SVT constituyen un 77% de los Sólidos Totales (STT) como se aprecia en la Tabla N°6.7, lo cual se ajusta con la teoría que señala que los SVT representan alrededor de un 80% de los STT para los desechos porcinos.

Tabla N°6.6: Distribución porcentual de sólidos

| Sólidos                 | Muestreo     |              |              |              |              | Promedio   |
|-------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|------------|
|                         | 26/01/02     | 23/02/02     | 27/04/02     | 29/06/02     | 04/09/02     |            |
| <b>Total</b>            | 100          | 100          | 100          | 100          | 100          | <b>100</b> |
| <b>Fijo</b>             | 25,14        | 26,39        | 27,55        | 16,17        | 21,02        | <b>23</b>  |
| <b>Volátil</b>          | 74,86        | 73,61        | 72,45        | 83,83        | 78,98        | <b>77</b>  |
| <b>Disuelto Total</b>   | <b>11,08</b> | <b>30,73</b> | <b>31,05</b> | <b>9,64</b>  | <b>15,92</b> | <b>20</b>  |
| <b>Fijo</b>             | 7,03         | 16,32        | 17,14        | 5,64         | 9,29         | <b>11</b>  |
| <b>Volátil</b>          | 4,05         | 14,41        | 13,91        | 4,00         | 6,63         | <b>9</b>   |
| <b>Suspendido Total</b> | <b>88,92</b> | <b>69,27</b> | <b>68,95</b> | <b>90,36</b> | <b>84,08</b> | <b>80</b>  |
| <b>Fijo</b>             | 18,11        | 10,07        | 10,41        | 10,54        | 11,73        | <b>12</b>  |
| <b>Volátil</b>          | 70,82        | 59,20        | 58,54        | 79,82        | 72,35        | <b>68</b>  |

Así mismo, se obtuvo gran cantidad de Sólidos Suspendidos Totales (SST), representando un 80% de los STT. Los SST incluyen muchos de los sólidos orgánicos, este resultado se corresponde con los SVT, dichos sólidos están estrechamente relacionados. Al comparar los Sólidos Suspendidos Fijos (SSF) con los Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV) se encuentra que estos últimos constituyen el mayor porcentaje de los SST.

Los Sólidos Disueltos Totales (SDT) resultaron ser el menor porcentaje de los STT. Los SDT se componen de moléculas orgánicas, inorgánicas (mineral) e iones, estas últimas escasas en el líquido residual. De la misma manera los Sólidos Fijos Totales (SFT) sólo constituyen el 23% de los STT; los SFT están constituidos básicamente por minerales.

El nitrógeno de las excretas de los cerdos es el elemento de fertilización predominante, ya que la dieta suministrada a los cerdos en el Modelo Físico está conformada por un alto porcentaje de proteínas (núcleo proteínico, plantas acuáticas) lo cual contribuye en la cuantificación de este elemento en el efluente de la granja y

así mismo, en las distintas formas de nitrógeno presentes y los caminos que siguen sus transformaciones.

El Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK) alcanzó una concentración promedio de 1431 mg/l en el afluente. El NTK se compone principalmente de nitrógeno orgánico y amoniacal. El nitrógeno presente en el agua residual reciente, se encuentra principalmente en forma de úrea y materia proteica. El mayor porcentaje del NTK del efluente de la granja está constituido por nitrógeno orgánico. Las concentraciones promedio de nitrógeno amoniacal y orgánico del efluente de la granja son 497 mg/l y 934 mg/l respectivamente.

El NTK de enero es menor a los obtenidos en febrero y abril, como se señaló antes se recogen menos excretas para enero, recordando que las excretas contienen nitrógeno en su composición; además a los cerdos se les suministra más plantas acuáticas en febrero y abril. Las plantas contribuyen a la concentración de nitrógeno en el afluente ya que las mismas estas constituidas por un porcentaje de proteína (aminoácidos). Ahora, comparando junio con septiembre, este último presentó una mayor concentración de nitrógeno favorecida por la tasa de excreción en dicho muestreo. Por otro lado, el nitrógeno orgánico se mantuvo superior al amoniacal para los diferentes ensayos.

El nitrógeno en forma de nitritos fue inapreciable, debido probablemente a la inestabilidad de estas sales y en nitratos se obtuvo una concentración máxima de 0,35 mgN/l, como era de esperarse ya que se trata del efluente fresco en el que no se ha iniciado el proceso de degradación, lo cual está acorde con lo expresado en el marco teórico sobre el predominio de nitratos cuando se ha estabilizado el agua residual con respecto a la demanda de oxígeno.

El Fósforo Total (TPP) promedio alcanzado de 326 mg/l se encuentra en el orden del TPP obtenido en granjas porcinas, atribuible a las excretas; al igual que el

nitrógeno y el potasio pero en menos proporción el fósforo se encuentra presente en las excretas porcinas.

En el afluente se cuantificó una considerable concentración de cloruro, como se aprecia en la Tabla N° 6.5, ante una mayor cantidad de cerdos, por ejemplo, en septiembre (48 cerdos) es más elevada la concentración de cloruro en comparación a junio (21 cerdos). La concentración de cloruro en el líquido residual se atribuye principalmente a las sales generadas por los cerdos a través de la orina ya que a estos animales no se les suministra sal en su dieta. La excepción es el mes de abril que presenta mayor concentración de cloruro en relación a febrero con mayor número de animales, esta diferencia se debe a que en abril los animales son adultos los cuales expulsan mayor volumen de orina.

En resumen, el efluente de la granja en estudio se caracteriza como altamente agresivo para descargarse a cuerpos de agua directamente. Al comparar los resultados de la Tabla N°6.5 con la normativa se verifica que no se cumple con los valores mínimos permitidos para la disposición de dicho efluente en cuerpos de agua, donde por ejemplo, la DBO debe ubicarse en 60 mg/l, fósforo total en 10 mg/l y nitrógeno total 40 mg/l. Los parámetros físico-químicos del afluente o entrada al biodigestor demuestran la necesidad del manejo y tratamiento adecuado de los desechos generados en la unidad de cerdos con el propósito de proteger la calidad del ambiente así mismo aprovechar eficientemente tales desechos.

Por otro lado, en el laboratorio se preparó una muestra con las excretas recolectadas en la unidad de cerdos y agua, el objetivo de dicha muestra es ajustar los valores de  $DBO_{5,20}$ , DQO, L y DeT.

**Tabla N°6.7:** Muestra preparada en el laboratorio excretas mas agua

| Análisis                        | 26/01/02 | 23/02/02 | 26/04/02 |
|---------------------------------|----------|----------|----------|
| <b>DBO<sub>5,20</sub>(mg/l)</b> | 2280     | 3143     | 4650     |
| <b>DQO(mg/l)</b>                | 4000     | 19850    | 12780    |

Por otra parte, el aporte unitario de carga orgánica en término de DBO<sub>5,20</sub> por cerdo fue de 92 g/cerdo\*día y DQO 315 g/cerdo\*día, como se aprecia en la Tabla N°6.8. Esto representa el doble del aporte unitario para humanos, el cual se encuentra aproximadamente en 54 g/persona\*día.

En cuanto al aporte de los sólidos este se encuentra en 225 g/cerdo\*día como se observa en la Tabla N°6.8, demostrando un alto poder polucional por cerdo. Respecto a la DQO se tiene 315 g/cerdo\*día representando una alta presencia de materia orgánica biodegradable por cerdo y oxidable químicamente, además, el aporte unitario de nitrógeno y fósforo reflejan el valor del efluente de la granja como abono orgánico, el cual a través del proceso de digestión anaerobia se mejora su calidad para disponerlo adecuadamente en riego de cultivos

**Tabla N°6.8:** Aportes unitarios por cerdo

| Parámetros                              | Muestreo |          |          |          |          | Promedio   |
|---|----------|----------|----------|----------|----------|------------|
|   | 26/01/02 | 23/02/02 | 27/04/02 | 29/06/02 | 04/09/02 |            |
| <b>DBO<sub>5,20</sub> (g/cerdo.día)</b> | 34       | 98       | 134      | 114      | 81       | <b>92</b>  |
| <b>DQO (g/cerdo.día)</b>                | 104      | 349      | 394      | 416      | 313      | <b>315</b> |
| <b>Sólidos (g/cerdo.día)</b>            |          |          |          |          |          |            |
| <b>Total</b>                            | 172      | 95       | 226      | 390      | 242      | <b>225</b> |
| <b>Fijo</b>                             | 43       | 25       | 62       | 63       | 51       | <b>49</b>  |
| <b>Volátil</b>                          | 129      | 70       | 164      | 327      | 191      | <b>176</b> |

Continuación...

Tabla N°6.8: Aportes unitarios por cerdo (continuación)

| Parámetros                                       | Muestreo |          |          |          |          | Promedio   |
|--|----------|----------|----------|----------|----------|------------|
|  | 26/01/02 | 23/02/02 | 27/04/02 | 29/06/02 | 04/09/02 |            |
| <b>Disuelto total</b>                            | 19       | 29       | 70       | 38       | 38       | <b>39</b>  |
| <b>Fijo</b>                                      | 12       | 16       | 39       | 22       | 22       | <b>22</b>  |
| <b>Volátil</b>                                   | 7        | 14       | 31       | 16       | 16       | <b>17</b>  |
| <b>Suspendido total</b>                          | 153      | 66       | 156      | 353      | 203      | <b>186</b> |
| <b>Fijo</b>                                      | 31       | 10       | 24       | 41       | 28       | <b>27</b>  |
| <b>Volátil</b>                                   | 122      | 56       | 132      | 312      | 175      | <b>159</b> |
| <b>Sólidos sedimentables (l/cerdo.día)</b>       | 1        | 1        | 4        | 3        | 5        | <b>3</b>   |
| <b>Nitrógeno NTK (g/cerdo.día)</b>               | 5        | 11       | 23       | 12       | 7        | <b>12</b>  |
| <b>Amoniacal</b>                                 | 2        | 3        | 15       | 5        | 3        | <b>5</b>   |
| <b>Orgánico</b>                                  | 3        | 9        | 8        | 7        | 4        | <b>6</b>   |
| <b>Fósforo total (g/cerdo.día)</b>               | 1        | 3        | 3        | 3        | 2        | <b>2</b>   |
| <b>Ortofosfato (g/cerdo.día)</b>                 | 0        | 1        | 1        | 2        | 2        | <b>1</b>   |
| <b>Cloruro (g/cerdo.día)</b>                     | 3        | 3        | 6        | 3        | 3        | <b>4</b>   |
| <b>Sulfato (g/cerdo.día)</b>                     | 1        | 1        | 4        | 1        | 1        | <b>2</b>   |
| <b>Aporte Volumétrico Unitario (l/cerdo.día)</b> | 4,3      | 7,7      | 13,9     | 9,0      | 4,6      | <b>7,9</b> |

Cuando se compara los aportes unitarios de la Granja evaluada o Granja D, con otras granjas, como se aprecia en la Tabla N°6.9, la gran diferencia se refleja en la DBO<sub>5,20</sub> y DQO; parámetros que son elevados para la granja estudiada, diferencia que se atribuye principalmente a la dieta suministrada en el Modelo Físico (plantas acuáticas, grano de soya, jugo de caña, ACPA), ya que la misma no está constituida por alimentos concentrados, es decir, la dieta tradicional, manejada en las granjas convencionales A, B y C.

Sin embargo, los restantes parámetros físico-químicos de la granja en estudio, como se aprecia en la Tabla N°6.9, se encuentran en el orden de los efluentes de las granjas convencionales, cuya diferencia predominante radica en la alimentación.

Tabla N°6.9: Aportes unitarios de diferentes granjas

| Parámetros                                       | Granja A<br>(3040 Cerdos) | Granja B<br>(5335 Cerdos) | Granja C<br>(4300 Cerdos) | Granja D<br>(35 Cerdos) |
|--|---------------------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------|
| <b>DBO<sub>5,20</sub> (g/cerdo.día)</b>          | 33                        | 29                        | 54                        | <b>92</b>               |
| <b>DQO (g/cerdo.día)</b>                         | 154                       | 106                       | 141                       | <b>315</b>              |
| <b>Sólidos (g/cerdo.día)</b>                     |                           |                           |                           |                         |
| <b>Total</b>                                     | 199                       | 225                       | 157                       | <b>225</b>              |
| <b>Fijo</b>                                      | 42                        | 77                        | 42                        | <b>49</b>               |
| <b>Volátil</b>                                   | 157                       | 148                       | 119                       | <b>176</b>              |
| <b>Disuelto total</b>                            | 42                        | 77                        | 42                        | <b>39</b>               |
| <b>Fijo</b>                                      | 16                        | 44                        | 21                        | <b>22</b>               |
| <b>Volátil</b>                                   | 26                        | 33                        | 21                        | <b>17</b>               |
| <b>Suspendido total</b>                          | 157                       | 148                       | 115                       | <b>186</b>              |
| <b>Fijo</b>                                      | 27                        | 33                        | 17                        | <b>27</b>               |
| <b>Volátil</b>                                   | 131                       | 115                       | 98                        | <b>159</b>              |
| <b>Sólidos sedimentables (l/cerdo.día)</b>       | 2,9                       | 2,1                       | 2,5                       | <b>3,0</b>              |
| <b>Nitrógeno NTK (g/cerdo.día)</b>               | 10,4                      | 11,9                      | 9,0                       | <b>12,0</b>             |
| <b>Amoniacal</b>                                 | 3,8                       | 7,2                       | 4,0                       | <b>5,0</b>              |
| <b>Orgánico</b>                                  | 6,6                       | 4,7                       | 5,0                       | <b>6,0</b>              |
| <b>Fósforo total (g/cerdo.día)</b>               | -                         | 2,7                       | 1,0                       | <b>2,0</b>              |
| <b>Cloruro (g/cerdo.día)</b>                     | 0,4                       | -                         | 2,0                       | <b>4,0</b>              |
| <b>Sulfato (g/cerdo.día)</b>                     | -                         | -                         | -                         | <b>2,0</b>              |
| <b>Aporte volumétrico Unitario (l/cerdo.día)</b> | 6,4                       | 9,9                       | 10,8                      | <b>8,0</b>              |

Además de los parámetros físico – químicos analizados se encuentran la constante de velocidad de oxidación de materia carbonácea ( $k_{10}$ ) y total ( $k_{OT}$ ), la demanda última de primera etapa (L) y la demanda última de oxígeno total (DeT). Los dos primeros indican la facilidad de biodegradación del líquido residual y el segundo los requerimientos de oxígeno a satisfacer para lograr la estabilización de la materia orgánica carbonácea y la combinada (carbonácea – nitrogenada).

En granjas porcinas los efluentes contienen un elevado contenido de nitrógeno amoniacal y orgánico, esto indica que durante el proceso de hidrólisis de proteínas se produce materia no carbonácea como el amoníaco. Esto se conoce con el nombre de demanda bioquímica de oxígeno nitrogenada o demanda última de oxígeno total (DeT), la cual está asociada con el proceso de oxidación de amoníaco a nitrato. Normalmente aparecen bacterias nitrificantes las cuales demandan oxígeno y el análisis se perturba. En la determinación de  $L$  y  $k_{10}$  se desea conocer la fase sin nitrificar, para estudiar sólo la primera etapa y tener conocimiento cuando comienza la segunda. Es por ello que se determinó la demanda de oxígeno con inhibidor. Para complementar el conocimiento de la demanda de oxígeno total requerida para estabilizar tanto la materia carbonácea y nitrogenada se determinó DeT, la cual es el requerimiento global a satisfacer de oxígeno por las bacterias presentes, la cual se determinó en ausencia del inhibidor. Además al conocer el valor de  $L$  se puede relacionar con el obtenido como  $DBO_{5,20}$ , el cual representa un 67% aproximadamente de la demanda de las bacterias no nitrificantes.

Con respecto al afluente se realizaron dos estudios: el primero consta de los meses de enero, febrero y abril, en el cual se capturaron muestras del agua de lavado y excretas por separado. El segundo estudio corresponde a los muestreos de junio y septiembre, captándose una muestra global del afluente de la unidad de cerdos.

**Primer Estudio:** En la Tabla N°6.10 se indican los valores de la demanda última de oxígeno total y carbonácea obtenidos a través del balance de masa en la entrada del biodigestor. DeT se encuentra entre 12087 y 12785 mg/l sin emplear inhibidor, mientras con su empleo, se determinó  $L$  entre 10354 y 11521 mg/l. El valor promedio se perfila en 12407 y 10790 mg/l, para DeT y  $L$ . Se puede observar que los valores obtenidos sin inhibidor son mayores en comparación de su adición, determinando la demanda real del efluente.

**Tabla N°6.10:** Demanda última de oxígeno en el afluente del biodigestor

| Parámetro  | 26/01/02 | 23/02/02 | 27/04/02 | Promedio     |
|------------|----------|----------|----------|--------------|
| DeT (mg/l) | 12350    | 12785    | 12087    | <b>12407</b> |
| L (mg/l)   | 10495    | 10354    | 11521    | <b>10790</b> |

Por otra parte la constante de oxidación obtenida para el afluente se encuentra entre los resultados para el agua de lavado y las excretas diluidas en agua, como se indican en las Tablas N°6.11 y 6.12. Para el agua de lavado la  $k_{OT}$  posee un promedio de  $0,149 \text{ días}^{-1}$ , menor que la velocidad de reacción  $k_{10}$ , de primera etapa  $0,166 \text{ días}^{-1}$ . Mientras las excretas diluidas  $0,070$  y  $0,108 \text{ días}^{-1}$ . Se puede esperar que la constante de oxidación del afluente esté en este orden. En estas muestras se identificaron las constantes sin inhibidor menores que con su aplicación.

**Tabla N°6.11:** Constante de velocidad de oxidación (agua de lavado)

| Parámetro       | 26/01/02 | 23/02/02 | 27/04/02 | Promedio     |
|-----------------|----------|----------|----------|--------------|
| $k_{OT}$ (mg/l) | 0,147    | 0,122    | 0,178    | <b>0,149</b> |
| $k_{10}$ (mg/l) | 0,132    | 0,139    | 0,226    | <b>0,166</b> |

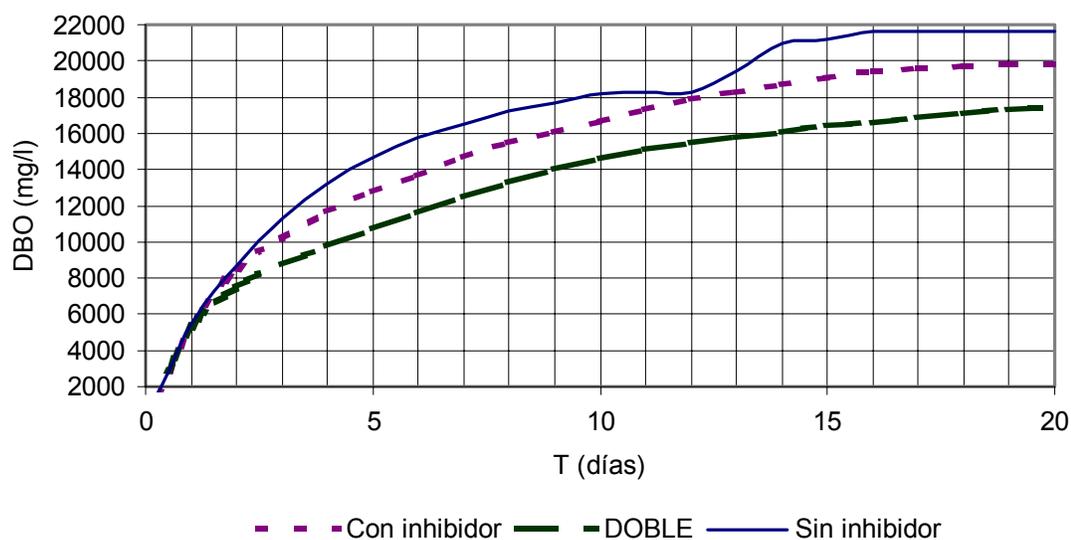
**Tabla N°6.12:** Constante de velocidad de oxidación (excretas + agua)

| Parámetro       | 26/01/02 | 23/02/02 | 27/04/02 | Promedio     |
|-----------------|----------|----------|----------|--------------|
| $k_{OT}$ (mg/l) | 0,095    | 0,007    | 0,108    | <b>0,070</b> |
| $k_{10}$ (mg/l) | 0,125    | 0,109    | 0,089    | <b>0,108</b> |

**Segundo Estudio:** A continuación se muestran los resultados obtenidos de muestreos integrales del afluente.

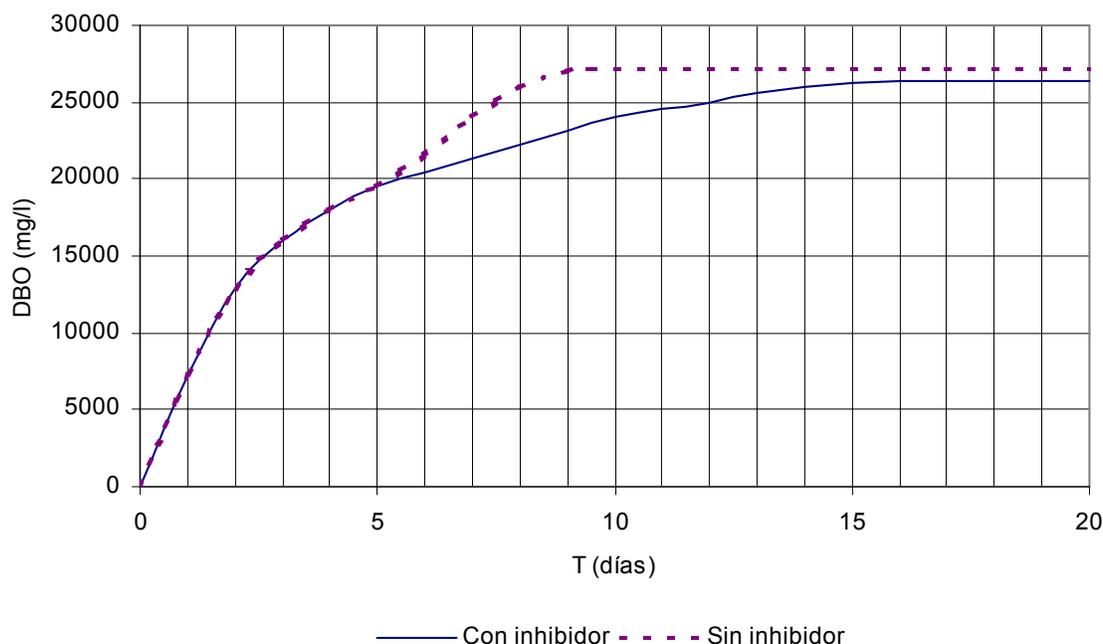
**Afluente 29/06/2002.** La etapa carbonácea culmina el día 2, como se observa en la curva sin inhibidor de la Figura N° 6.1. Con relación al afluente con inhibidor, se sembraron en esa oportunidad muestras con inhibidor simple y doble, debido a problemas en las gráficas de DBO vs. Tiempo, pues en análisis anteriores, las curvas correspondientes a las experiencias con y sin inhibidor se interceptaban o invertían su

comportamiento. Este resultado se atribuye a probables interferencias con el inhibidor. Además la curva de inhibidor simple y doble deberían estar superpuestas, sin embargo, debido a su separación se podría inferir que la sustancia inhibidora con la concentración simple no logra impedir el desarrollo de las bacterias nitrificantes completamente.



**Figura N°6.1:** Demanda de oxígeno para el afluente, 29/06/2002

- **Afluente 04/09/2002.** Para este ensayo, como se observa en la Figura N°6.2 la etapa nitrogenda inicia el día 5, a diferencia del afluente del mes de junio que aparece el día 2. Esta temprana aparición se puede adjudicar a concentraciones altas de nitrógeno amoniacal y orgánico en el afluente.



**Figura N°6.2:** Demanda de oxígeno para el afluente, 04/09/2002

En la Tabla N°6.13 se indica una demanda última de oxígeno total promedio, obtenida sin inhibidor igual a 24620 mg/l y una demanda carbonácea de oxígeno (con inhibidor) en el orden de 23228 mg/l. Además se puede observar que los valores obtenidos bajo estas dos condiciones, en semejanza a los reportados en la Tabla N°6.10, son mayores sin el inhibidor, comprobándose que existe una mayor demanda en presencia de las fases carbonácea y nitrogenada en conjunto. Por otra parte los valores del primer estudio del afluente son prácticamente la mitad que los determinados en este segundo estudio. Esto se le confiere a la diferencia de captación de la muestra, afirmándose que el muestreo compuesto global es más representativo.

**Tabla N°6.13:** Demanda última de oxígeno en el afluente del biodigestor

| Parámetro  | 29/06/02 | 04/09/02 | Promedio     |
|------------|----------|----------|--------------|
| DeT (mg/l) | 21637    | 27602    | <b>24620</b> |
| L (mg/l)   | 20410    | 26045    | <b>23228</b> |

En la Tabla N°6.14 se reportan los valores de la constante de velocidad de oxidación  $k_{OT}$  y  $k_{10}$  obtenidos por la mejor correlación. El promedio sin y con inhibidor es 0,105 y 0,097 y días<sup>-1</sup> respectivamente. Estas velocidades se encuentran en el rango de las constantes del agua de lavado y excretas diluidas, como se observó en las Tablas N°6.11 y 6.12. A diferencia de los resultados de la demanda última, la constante de velocidad de oxidación es menor sin inhibidor, esto indica una menor velocidad de oxidación en presencia de la demanda combinada, probablemente por la alta carga orgánica presente. Es por ello que se prefiere un tratamiento anaerobio, implicando otras bacterias para el mayor provecho del efluente, obteniéndose biogas, bioabono y agua tratada.

**Tabla N°6.14:** Constante de velocidad de oxidación en el afluente del biodigestor

| Parámetro       | 29/06/02 | 04/09/02 | Promedio     |
|-----------------|----------|----------|--------------|
| $k_{OT}$ (mg/l) | 0,088    | 0,122    | <b>0,105</b> |
| $k_{10}$ (mg/l) | 0,069    | 0,124    | <b>0,097</b> |

Los valores de la demanda última carbonácea de oxígeno se encuentran alejados con respecto a los reportados por Mezones y Palacios en la Tabla N°3.4, pues los correspondientes al análisis de esta investigación son mucho mayores, esto se debe a la diferencia en la dieta de los cerdos. En los estudios de referencia empleaban alimentos concentrados, mientras en la granja en estudio se emplean jugo de caña o suero verde, grano de soya, plantas acuáticas, iniciador y aceite crudo de palma.

### **6.3.2. Efluente o salida del biodigestor**

En la fermentación bacteriana intervienen poblaciones microbianas diversas, en una primera fase donde a través de reacciones enzimáticas los compuestos orgánicos de alto peso molecular se degradan en compuestos más sencillos utilizables como fuente de energía y síntesis de nuevo material celular; una segunda etapa donde

ocurre una conversión biológica a compuestos de peso molecular intermedio y finalmente estos últimos son transformados en metano ( $\text{CH}_4$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ).

Los parámetros físico-químicos obtenidos a la salida del biodigestor reflejan la eficiente degradación de la materia orgánica por los microorganismos como se aprecia en la Tabla N°6.15.

El pH obtenido a la salida es mayor en comparación a la entrada. El pH a la salida manifiesta el equilibrio alcanzado en las etapas de la digestión anaerobia, probablemente dicho equilibrio se deba a la alcalinidad obtenida que mantuvo su valor en relación a la entrada como se aprecia en la Tabla N°6.15.

La conductividad aumentó significativamente, esto se explica a razón que en el biodigestor los microorganismos consumen la materia orgánica mientras que la inorgánica se mantiene inalterada como es el caso de las sales (cloruro, sulfato) las cuales determinan la conductividad, esto además, justifica la concentración de cloruro obtenida a la salida del digestor.

En el caso de los sólidos a diferencia del afluente, los Sólidos Disueltos Totales (SDT) del efluente alcanzaron el mayor porcentaje, es decir, un 75% de los Sólidos Totales (STT). Este resultado se debe a la naturaleza inorgánica (minerales e iones) de los sólidos disueltos. Al mismo tiempo los Sólidos Fijos Totales (SFT) se mantuvieron en el transcurso de la evaluación, como se observa en la Tabla N°6.15.

La  $\text{DBO}_{5,20}$  a la salida alcanzó un promedio de 186 mg/l y la DQO llegó a 2411 mg/l, estos resultados son positivos ya que manifiestan una importante reducción de la materia orgánica biodegradable y oxidable químicamente dentro del biodigestor. Así mismo, la disminución de la relación DBO/DQO refleja la eliminación de materia orgánica biodegradable por las bacterias.

Tabla N°6.15: Parámetros físico-químicos del efluente o salida del biodigestor

| Parámetros físico-químicos            | Muestreo |          |          |          |          |          | Promedio           |
|---------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--------------------|
|                                       | 26/01/02 | 23/02/02 | 27/04/02 | 29/06/02 | 19/07/02 | 04/09/02 |                    |
| pH                                    | 8,1      | 8,0      | 7,7      | 7,0      | 7,4      | 7.4      | 7,4 <sup>(*)</sup> |
| Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /l) | 4100     | 4040     | 3400     | 3440     | 3560     | 4400     | <b>3823</b>        |
| Temperatura (°C)                      | 26,8     | 28       | 27       | 27       | 32       | 29.8     | <b>28</b>          |
| Conductividad (µS/cm)                 | 7850     | 8740     | 8450     | 8560     | 8980     | 10160    | <b>8790</b>        |
| Oxígeno disuelto (mg/l)               | 0,5      | 1,4      | 0,6      | 4        | 0,1      | 0        | <b>1</b>           |
| DBO <sub>5,20</sub> (mg/l)            | 125      | 308      | 156      | 72       | 216      | 240      | <b>186</b>         |
| DQO (mg/l)                            | 6400     | 865      | 1139     | 767      | 2255     | 3037     | <b>2411</b>        |
| DBO/DQO (adimensional)                | 0,02     | 0,36     | 0,14     | 0,09     | 0,10     | 0,08     | <b>0,13</b>        |
| Sólidos (mg/l)                        |          |          |          |          |          |          |                    |
| <b>Total</b>                          | 5484     | 3602     | 4280     | 3100     | 3544     | 3794     | <b>3967</b>        |
| <b>Fijo</b>                           | 3074     | 2278     | 2770     | 2246     | 2686     | 2800     | <b>2642</b>        |
| <b>Volátil</b>                        | 2410     | 1324     | 1510     | 854      | 858      | 994      | <b>1325</b>        |
| <b>Disuelto total</b>                 | 2486     | 2922     | 3100     | 2818     | 3214     | 3300     | <b>2973</b>        |
| <b>Fijo</b>                           | 2170     | 2010     | 2470     | 2156     | 2540     | 2524     | <b>2312</b>        |
| <b>Volátil</b>                        | 828      | 912      | 630      | 662      | 674      | 776      | <b>747</b>         |
| <b>Suspendido total</b>               | 2486     | 680      | 1180     | 282      | 330      | 494      | <b>909</b>         |
| <b>Fijo</b>                           | 904      | 268      | 300      | 90       | 146      | 276      | <b>331</b>         |
| <b>Volátil</b>                        | 1582     | 412      | 880      | 192      | 189      | 218      | <b>579</b>         |
| Sólidos sedimentables (ml/l)          | 195      | 7        | 40       | 0,1      | 0        | 0,5      | <b>40</b>          |
| Nitrógeno NTK (mg N/l)                | 1271     | 437      | 1758     | 1288     | 924      | 1316     | <b>1166</b>        |
| <b>Amoniacal</b>                      | 655      | 375      | 1086     | 476      | 252      | 504      | <b>558</b>         |
| <b>Orgánico</b>                       | 616      | 62       | 672      | 812      | 672      | 812      | <b>608</b>         |
| Nitrito (mg N/l)                      | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | <b>0</b>           |
| Nitrato (mg N/l)                      | 0        | 0        | 0        | 0        | 0,18     | 0        | <b>0,03</b>        |
| Fósforo total (mg P/l)                | 189      | 170      | 103      | 36       | 34       | 42       | <b>96</b>          |
| Ortofosfato (mg P/l)                  | 14       | 8        | 11       | 12,7     | 24       | 6,2      | <b>13</b>          |
| Cloruro (mg/l)                        | 598      | 430      | 606      | 448      | 725      | 569      | <b>563</b>         |
| Sulfato (mg/l)                        | 100      | 21       | 15       | 31       | 20       | 22       | <b>35</b>          |

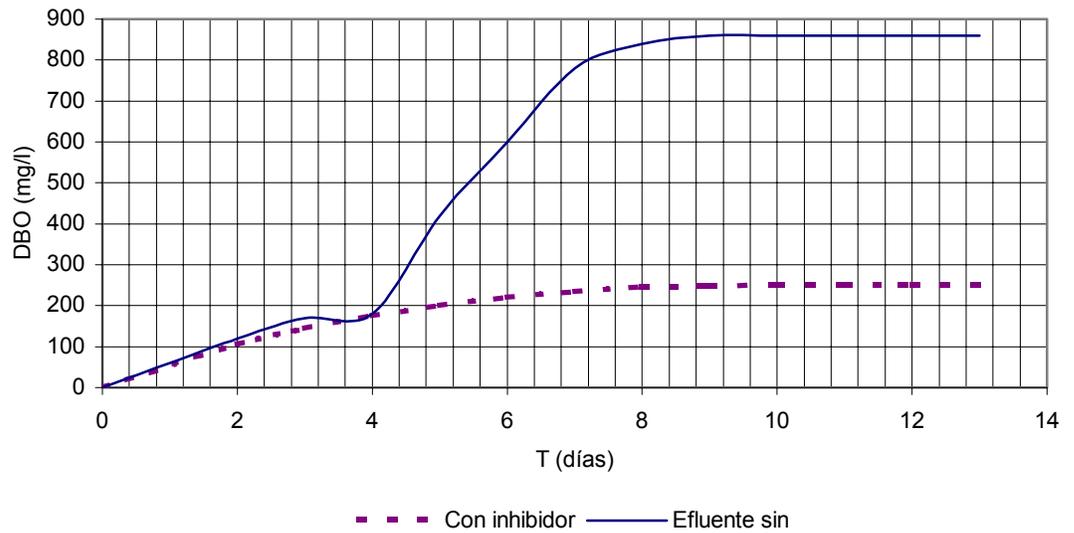
(\*) El pH promedio se determinó como el  $-\log \Sigma [H^+]/N^\circ$  de muestreos

El Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK) del efluente no se aleja de la concentración a la cual entra al biodigestor, de la misma manera se comporta su distribución en amoniacal y orgánico. En un ambiente aerobio, las bacterias pueden oxidar el nitrógeno del amoníaco a nitritos y nitratos. Se conoce que en el biodigestor los microorganismos presentes son bacterias anaerobias, razón por la cual no se producen alteraciones apreciables del nitrógeno.

El Fósforo Total (TPP) se reduce significativamente con respecto a la entrada. Las condiciones anaerobias permiten la remoción de fósforo por descomposición bacteriana.

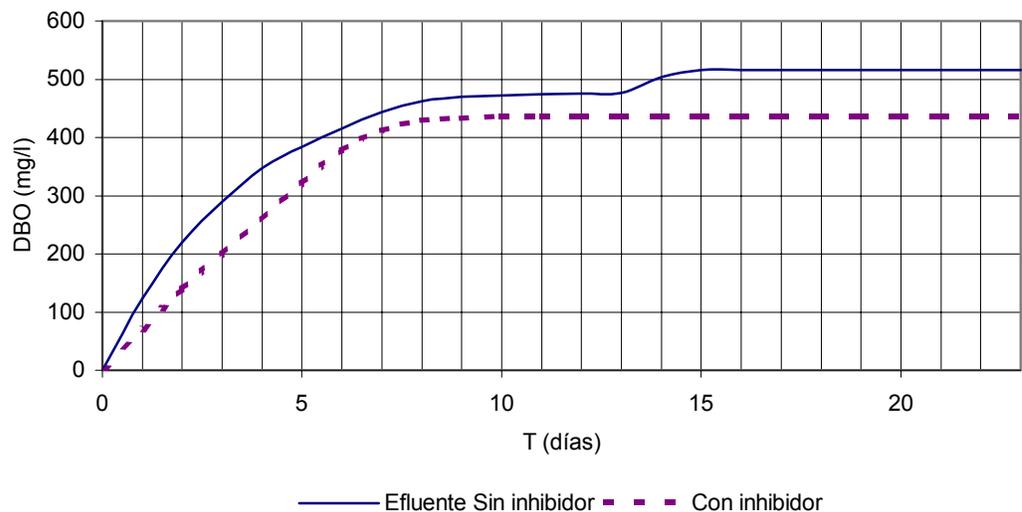
A continuación se describen los resultados del análisis de la demanda última de oxígeno (carbonácea y total) y las constantes de velocidad de oxidación para el efluente. Analizándose por muestreo. De igual forma la demanda de oxígeno total está representada sin inhibidor y la demanda última carbonácea de oxígeno con inhibidor.

- ***Efluente 26/01/2002.*** Se observa en la Figura N° 6.3 el inicio de la fase nitrogenada en el cuarto día del estudio sin inhibidor. Además es notorio una significativa diferencia en el desarrollo del ejercicio de ambas demandas.



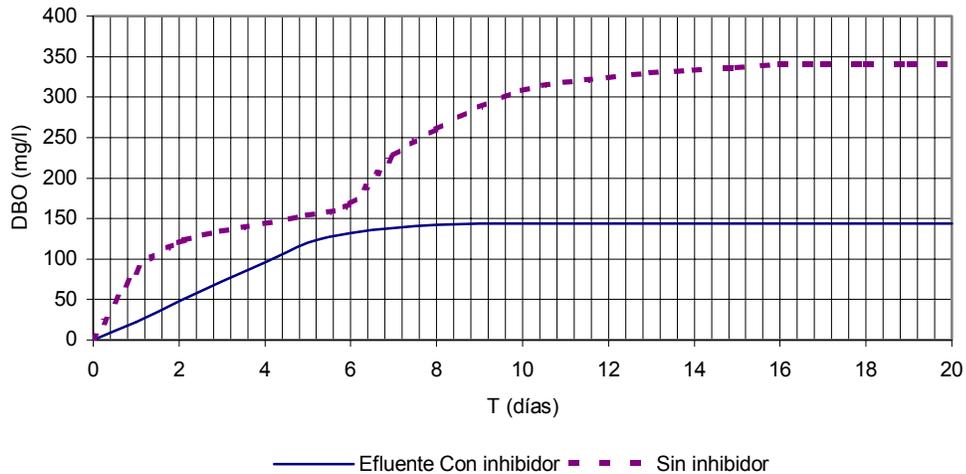
**Figura N°6.3:** Demanda de oxígeno para el efluente, 26/01/2002

- **Efluente 23/02/2002.** En la Figura N° 6.4 existe una diferencia de 100 mg/l en el ejercicio de la fase carbonácea y nitrogenada. Además es notorio la presencia adelantada del ejercicio combinado, debido a las altas concentraciones de nitrógeno amoniacal y orgánico en el efluente.



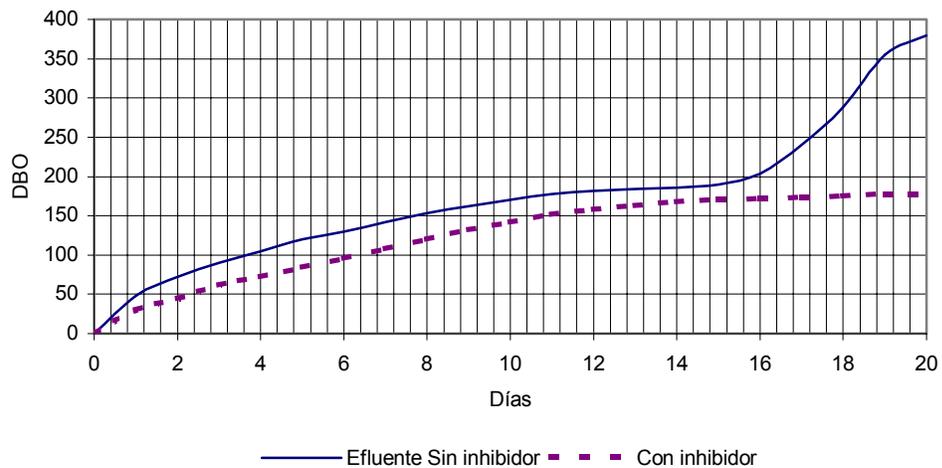
**Figura N°6.4:** Demanda de oxígeno para el efluente, 23/02/2002

- **Efluente 27/04/2002.** La demanda combinada en esta oportunidad nuevamente se inició desde el primer día del análisis, como se indica en la Figura N°6.5.



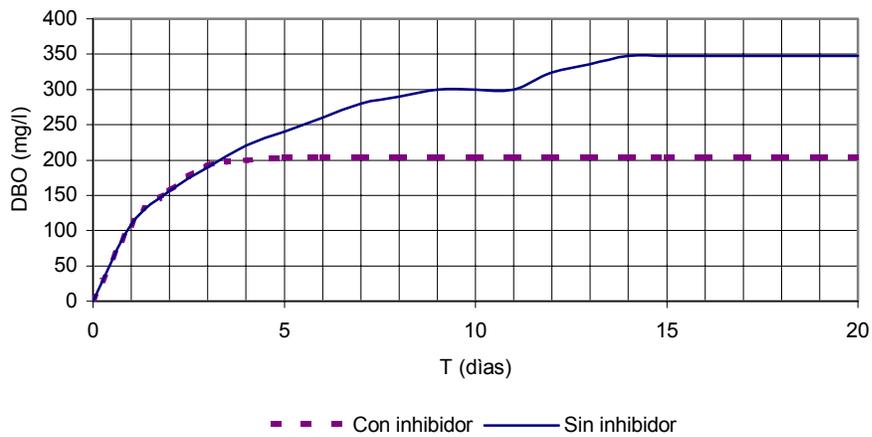
**Figura N°6.5:** Demanda de oxígeno para el efluente, 27/04/2002

- **Efluente 29/06/2002.** Se observa en la Figura N°6.6 el temprano desarrollo de la etapa nitrificante, afirmándose el efecto de las concentraciones de nitrógeno en la evolución de las bacterias nitrificantes, además para el día 20 no se estabilizó la demanda para la fase combinada.



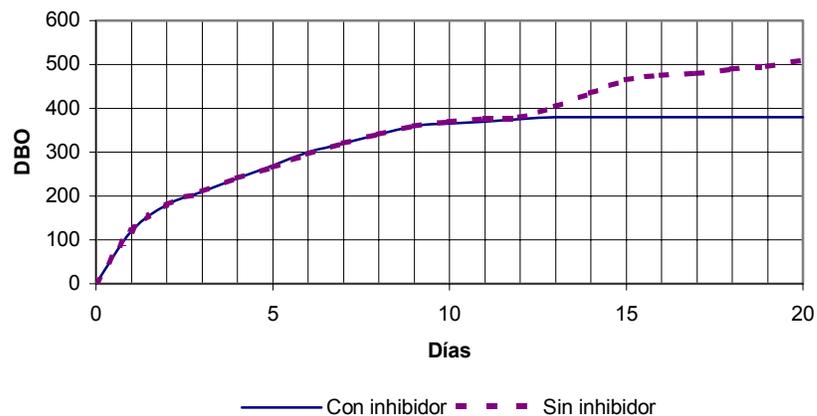
**Figura N°6.6:** Demanda de oxígeno para el efluente, 29/06/2002

- **Efluente 19/07/2002.** Se observa en la Figura N°6.7 la separación de las etapas a partir del día tres de ejercicio de la DBO y una marcada diferencia entre ambas experiencias.



**Figura N°6.7:** Demanda de oxígeno para el efluente, 19/07/2002

- **Efluente 04/09/2002.** Se muestra en la Figura N°6.8 el desarrollo de la fase nitrogenada a partir del día doce. Además ambas fases tienen un desarrollo similar hasta la aparición de las bacterias nitrificantes, observándose la diferencia de demanda de oxígeno.



**Figura N°6.8:** Demanda de oxígeno para el efluente, 04/09/2002

Normalmente para aguas residuales domésticas es necesario un período entre 6 y 10 días para que las bacterias nitrificantes ejerzan una demanda de oxígeno cuantificable, sin embargo la temprana aparición en las diferentes determinaciones de la demanda última, podría deberse a las altas concentraciones de nitrógeno amoniacal y orgánico en la salida del digestor, similares a las determinadas en la entrada. No obstante, Gaudy señala que la nitrificación se suprime con concentraciones mayores a 1400 mg/l de nitrógeno amoniacal. En la granja evaluada se determinó, valores menores como se indicó en las Tablas N° 6.5 y 6.15.

En la Tabla N°6.16 se observa un valor de demanda última de oxígeno total, DeT, determinada sin inhibidor entre 354 y 1267 mg/l mientras el rango de la demanda última carbonácea de oxígeno se encuentra entre 168 y 452 mg/l. Es significativo la disminución de demanda de oxígeno del efluente en comparación del afluente, sin embargo es necesario un tratamiento que remueva más materia orgánica, como lo es, en este caso las lagunas. El valor de DeT del muestreo de junio no se logró determinar debido al desarrollo en aumento de la demanda nitrogenada, la cual no se estabilizó para los últimos días de incubación, como se apreció en la Figura N°6.6. Similarmente no se logró calcular  $k_{OT}$ , pues los métodos matemáticos no convergieron.

**Tabla N°6.16:** Demanda última de oxígeno en el efluente del biodigestor

| Parámetro  | 26/01/02 | 23/02/02 | 27/04/02 | 29/06/02 | 19/07/02 | 04/09/02 | Promedio   |
|------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|------------|
| DeT (mg/l) | 1267     | 514      | 381      | ND       | 354      | 577      | <b>619</b> |
| L (mg/l)   | 277      | 452      | 168      | 206      | 217      | 391      | <b>287</b> |

En la Tabla N°6.17 se muestra los valores de la constante de velocidad de oxidación total,  $k_{OT}$ , sin inhibidor en un rango de 0,042 y 0,121 día<sup>-1</sup>, y de materia carbonácea,  $k_{I0}$ , con inhibidor, entre 0,045 y 0,284 día<sup>-1</sup>. Se observa que la velocidad de biodegradación total es menor que la carbonácea.

**Tabla N°6.17:** Constante de velocidad de oxidación en el efluente del biodigestor

| Parámetro       | 26/01/02 | 23/02/02 | 27/04/02 | 29/06/02 | 19/07/02 | 04/09/02 | Promedio     |
|-----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--------------|
| $k_{OT}$ (mg/l) | 0,047    | 0,121    | 0,065    | ND       | 0,087    | 0,042    | <b>0,072</b> |
| $k_{10}$ (mg/l) | 0,092    | 0,109    | 0,085    | 0,045    | 0,284    | 0,096    | <b>0,120</b> |

En cuanto al desempeño del inhibidor es de dudosa aceptación por la aparición de la segunda etapa en diferentes oportunidades, empleando dicha sustancia. Por lo tanto, se sugiere aplicar otras sustancias inhibidoras en el estudio del líquido residual de granjas porcinas.

Las características físico-químicas del efluente del biodigestor no cumplen con la normativa para vertidos a cuerpos de agua. Es por ello que las lagunas que complementan el sistema de tratamiento son necesarias no sólo para alimentar a los cerdos mediante la producción de plantas acuáticas sino para mejorar la calidad del agua de salida.

Por otra parte, para determinar el funcionamiento del biodigestor se requiere calcular la eficiencia de remoción de los diferentes parámetros físico-químicos, dicha determinación se aprecia en la Tabla N°6.18.

Cuando se comparan los parámetros físico-químicos del afluente y efluente del biodigestor, como se muestra en la Tabla N°6.18, se evidencia una importante reducción de dichos parámetros en especial  $DBO_{5,20}$ , DQO, STT, STV, SST, SSF, SSV, SS, TPP, fosfato y sulfato. La remoción de los sólidos mencionados se debe a la naturaleza orgánica de estos, los cuales son digeridos por los microorganismos para transformarlos en biogas y bioabono.

**Tabla N°6.18:** Eficiencia del biodigestor

| <b>Análisis</b>                     | <b>Entrada</b> | <b>Salida</b> | <b>%<br/>Remoción</b> |
|-------------------------------------|----------------|---------------|-----------------------|
| <b>DBO<sub>5,20</sub>(mg/l)</b>     | 12175          | 186           | <b>98</b>             |
| <b>DQO(mg/l)</b>                    | 42567          | 2411          | <b>94</b>             |
| <b>Sólidos (mg/l)</b>               |                |               |                       |
| <b>Total</b>                        | 33008          | 3967          | <b>88</b>             |
| <b>Fijo</b>                         | 7196           | 2642          | <b>63</b>             |
| <b>Volátil</b>                      | 25812          | 1325          | <b>95</b>             |
| <b>Disuelto total</b>               | 5182           | 2973          | <b>43</b>             |
| <b>Fijo</b>                         | 2999           | 2312          | <b>23</b>             |
| <b>Volátil</b>                      | 2183           | 747           | <b>66</b>             |
| <b>Suspendido total</b>             | 27826          | 909           | <b>97</b>             |
| <b>Fijo</b>                         | 4197           | 331           | <b>92</b>             |
| <b>Volátil</b>                      | 23628          | 579           | <b>98</b>             |
| <b>Sólidos sedimentables (ml/l)</b> | 413            | 40            | <b>90</b>             |
| <b>Nitrógeno NTK (mg N/l)</b>       | 1431           | 1166          | <b>19</b>             |
| <b>Amoniacal</b>                    | 591            | 558           | <b>6</b>              |
| <b>Orgánico</b>                     | 840            | 608           | <b>28</b>             |
| <b>Nitrito (mg/l)</b>               | 0              | 0             | <b>-</b>              |
| <b>Nitrato (mg/l)</b>               | 0              | 0,03          | <b>-</b>              |
| <b>Fósforo total (mg P/l)</b>       | 326            | 96            | <b>71</b>             |
| <b>Ortofosfato (mg P/l)</b>         | 160            | 13            | <b>92</b>             |
| <b>Sulfato (mg/l)</b>               | 191            | 35            | <b>82</b>             |

Se habla de remoción de materia orgánica biodegradable DBO en un 98% y materia degradable biológicamente y químicamente DQO en un 94%. Estos resultados son alentadores ya que reflejan la eficiencia del biodigestor en cuanto a remoción de materia orgánica que paralelamente se relaciona con la composición de biogas obtenida, donde la mayor proporción corresponde a metano (CH<sub>4</sub>) como se muestra al realizar el análisis de los subproductos.

### 6.3.3. *Lagunas*

Las lagunas productoras de plantas acuáticas son un paso complementario en el tratamiento de las aguas residuales provenientes del biodigestor plástico. En ellas operan factores físicos (filtración, sedimentación y adsorción) y biológicos (degradación y absorción). En la Tabla N°6.19 se percibe la resaltante reducción de los diferentes parámetros físico-químicos en las lagunas del Modelo Físico con respecto a la salida del biodigestor.

La remoción de la DBO en los sistemas con lentejas de agua se da como resultado de la actividad biológica. Se recomienda una carga de DBO de 27,5 Kg/Ha.día, mientras que en las lagunas evaluadas este valor es aproximadamente 2,7 Kg DBO/Ha.día. Este resultado refleja la subutilización de las lagunas, interesante ya que queda una importante capacidad de tratamiento disponible para garantizar el cumplimiento de las normas cuando se maneje una mayor carga, es decir, las lagunas ofrecen flexibilidad operacional.

Cada una de las lagunas representa una dilución del efluente proveniente del biodigestor. El efluente producto de la digestión anaerobia se descarga diariamente en una laguna (de las ocho existentes), una vez por semana. Adicionalmente, para mantener el nivel de líquido en las lagunas se emplea agua de suministro, lo cual contribuye con la dilución. En tal sentido, la operación de las lagunas no permite establecer un efecto de remoción global del sistema de descontaminación (biodigestor-lagunas), aún cuando se evidencia la reducción de los diferentes parámetros físico-químicos.

Las lagunas representan el medio donde se cosechan las plantas acuáticas (*Azolla* y *Lemna*) las cuales tienen la finalidad de suministrar la proteína para la dieta de los cerdos.

**Tabla N°6.19:** Parámetros físico-químicos de las lagunas

| Parámetro                                  | Laguna 1 |          |          | Laguna 2 | Laguna 3 |          | Laguna 4 |          |          | Laguna 5 | Laguna 6 |          |          | Laguna 8 | Promedio     |
|--|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--------------|
|  | 26/01/02 | 27/04/02 | 29/06/02 | 26/01/02 | 29/06/02 | 04/09/02 | 26/01/02 | 29/06/02 | 04/09/02 | 04/09/02 | 06/12/01 | 23/02/02 | 27/04/02 | 23/02/02 |              |
| <b>pH</b>                                  | 7,3      | 6,8      | 7,1      | 7,4      | 6,5      | 6,5      | 7,3      | 6,3      | 6,9      | 6,5      | 7        | 7        | 7        | 6,6      | <b>6,9</b>   |
| <b>Alcalinidad (mg CaCO<sub>3</sub>/l)</b> | 140      | 138      | 208      | 144      | 120      | 120      | 148      | 90       | 120      | 100      | 110      | 212      | 186      | 116      | <b>139,4</b> |
| <b>Temperatura (°C), en sitio</b>          | 26,3     | 27       | 28       | 27,2     | 27       | 29       | 27,8     | 27       | 29       | 26       | 29,2     | 28,9     | 27       | 27,6     | <b>27,6</b>  |
| <b>Conductividad (uS/cm)</b>               | 331      | 418      | 667      | 354      | 316      | 268      | 388      | 258      | 335      | 271      | 287      | 470      | 528      | 221      | <b>365,1</b> |
| <b>Oxígeno disuelto (mg/l)</b>             | 1,9      | 1,8      | 2,2      | 4,2      | 5        | 4,8      | 6        | 4,6      | 5,4      | 2,5      | 2,8      | 2,4      | 3        | 4,4      | <b>3,6</b>   |
| <b>DBO<sub>5,20</sub>(mg/l)</b>            | 15       | 28       | 59       | 26       | 10       | 19       | 26       | 17       | 12       | 21       | 13       | 32       | 5        | 20       | <b>21,6</b>  |
| <b>DQO(mg/l)</b>                           | 40       | 285      | 245      | 50       | 100      | 104      | 80       | 121      | 105      | 114      | 70       | 173      | 57       | 58       | <b>114,4</b> |
| <b>Sólidos (mg/l)</b>                      |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |              |
| <b>Total</b>                               | 264      | 635      | 868      | 322      | 438      | 239      | 345      | 408      | 302      | 622      | 462      | 658      | 353      | 284      | <b>442,9</b> |
| <b>Fijo</b>                                | 176      | 322      | 457      | 238      | 341      | 154      | 186      | 219      | 211      | 489      | 122      | 455      | 250      | 171      | <b>270,8</b> |
| <b>Volátil</b>                             | 88       | 313      | 411      | 84       | 97       | 85       | 159      | 189      | 91       | 133      | 340      | 203      | 103      | 113      | <b>172,1</b> |
| <b>Disuelto total</b>                      | 232      | 320      | 408      | 248      | 210      | 224      | 264      | 199      | 229      | 190      | 172      | 321      | 324      | 182      | <b>251,6</b> |
| <b>Fijo</b>                                | 176      | 203      | 245      | 188      | 141      | 143      | 165      | 123      | 184      | 114      | 10       | 212      | 224      | 119      | <b>160,5</b> |
| <b>Volátil</b>                             | 56       | 117      | 163      | 60       | 69       | 81       | 99       | 76       | 45       | 76       | 162      | 109      | 100      | 63       | <b>91,1</b>  |
| <b>Suspendido total</b>                    | 32       | 315      | 460      | 74       | 228      | 15       | 81       | 209      | 73       | 432      | 290      | 337      | 29       | 102      | <b>191,2</b> |
| <b>Fijo</b>                                | 0        | 119      | 212      | 50       | 200      | 11       | 21       | 96       | 27       | 375      | 112      | 243      | 26       | 52       | <b>110,3</b> |
| <b>Volátil</b>                             | 32       | 196      | 248      | 24       | 28       | 4        | 60       | 113      | 46       | 57       | 178      | 94       | 3        | 50       | <b>80,9</b>  |
| <b>Sólidos sedimentables (ml/l)</b>        | 0        | 2        | 1        | 0        | 0        | 0,5      | 0        | 1        | 0        | 5,5      | 1,5      | 6        | 0,1      | 14       | <b>2,3</b>   |
| <b>Nitrógeno NTK (mg N/l)</b>              | 9,56     | 7        | 17,1     | 9,22     | 11,2     | 7,8      | 9,76     | 9,6      | 15,7     | 21,6     | 17,92    | 24       | 8,2      | 6,4      | <b>12,5</b>  |
| <b>Amoniacal</b>                           | 1,96     | 2,5      | 3,6      | 1,12     | 1,1      | 3,6      | 1,96     | 1,1      | 5,6      | 7,6      | 2,24     | 11       | 3,4      | 1,9      | <b>3,5</b>   |
| <b>Orgánico</b>                            | 7,6      | 4,5      | 13,5     | 8,1      | 10,1     | 4,2      | 7,8      | 8,5      | 10,1     | 14       | 15,68    | 13       | 4,8      | 4,5      | <b>9,0</b>   |
| <b>Nitrito (mg N/l)</b>                    | 0,01     | 0        | 0        | 0,03     | 0        | 0        | 0,18     | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | <b>0,0</b>   |
| <b>Nitrato (mgN/l)</b>                     | 0,02     | 0        | 0        | 0,03     | 0        | 0        | 0,07     | 0        | 0        | 0        | 0        | 0,01     | 0        | 0,02     | <b>0,0</b>   |
| <b>Fósforo total (mg P/l)</b>              | 1,85     | 1,94     | 5,1      | 0,4      | 1,26     | 1,52     | 1,52     | 0,98     | 1,23     | 5,6      | 2,3      | 1,6      | 2,3      | 0,8      | <b>2,0</b>   |
| <b>Ortofosfato (mgP/l)</b>                 | 0,27     | 1,03     | 4,6      | 0,2      | 0,6      | 1,3      | 0,14     | 0,6      | 0,5      | 5,1      | 0        | 0,2      | 1,5      | 0,1      | <b>1,2</b>   |
| <b>Cloruro (mg/l)</b>                      | 8        | 34       | 52       | 14       | 15       | 12       | 19       | 21       | 18       | 23       | 14,7     | 18       | 40       | 1,8      | <b>20,8</b>  |
| <b>Fluoruro (mg/l)</b>                     | 0,36     | 0,26     | 0,16     | 0,34     | 0,18     | 0        | 0,33     | 0,18     | 0        | 0        | 0        | Inap     | 0,26     | 0        | <b>0,1</b>   |
| <b>Sulfato (mg/l)</b>                      | 7        | 7,8      | 9,4      | 9        | 9        | 8,2      | 10       | 6,5      | 4        | 8        | 8,6      | 6,6      | 4,2      | 4        | <b>7,3</b>   |

El pH promedio se determinó como el  $-\log \Sigma[H^+]/N^o$  de muestreos

#### 6.4. PARÁMETROS BIOLÓGICOS

En cuanto al análisis bacteriológico se presentan las Tablas N°6.20 y 6.21, las cuales corresponden a la entrada y salida del biodigestor respectivamente. Se obtienen más de  $10^8$  y  $10^{10}$  ufc/100ml en coliformes fecales y totales respectivamente, a la entrada del digestor. Los organismos coliformes son los más numerosos y más fáciles de detectar, no son dañinos al hombre y, de hecho, son útiles para estabilizar la materia orgánica en los procesos biológicos de tratamiento como se señaló en el marco teórico.

**Tabla N°6.20:** Parámetros biológicos a la entrada del biodigestor

| Parámetro                                | 04/09/2002          |
|--|---------------------|
| <b>Coliformes totales</b><br>(ufc/100ml) | $>1 \times 10^{10}$ |
| <b>Coliformes fecales</b><br>(ufc/100ml) | $2,8 \times 10^8$   |

En la salida del digestor se alcanzaron  $10^6$  ufc/100ml para ambos coliformes como se aprecia en la Tabla N°6.21, estas bacterias deben competir con otras especies dentro del biodigestor, lo cual ocasiona reducción de un gran porcentaje de estos microorganismos.

**Tabla N°6.21:** Parámetros biológicos a la salida del biodigestor

| Parámetro                                | 29/06/2002         | 04/09/2002        |
|--|--------------------|-------------------|
| <b>Coliformes totales</b><br>(ufc/100ml) | $1,00 \times 10^6$ | $5,1 \times 10^6$ |
| <b>Coliformes fecales</b><br>(ufc/100ml) | ND                 | $4,1 \times 10^6$ |

ND: No determinado

La remoción de las bacterias que entran en el sistema vegetal (plantas acuáticas), es similar a los mecanismos que se encuentran en funcionamiento en las lagunas: muerte natural, sedimentación, depredación, entre otros factores como se señaló en el marco teórico. En la Tabla N°6.22 se refleja una alta presencia de coliformes totales y fecales esto es debido posiblemente a la presencia de aves alrededor de las lagunas (cría de patos, pájaros) las cuales excretan y contribuyen a la concentración de estos microorganismos en dichas lagunas.

**Tabla N°6.22:** Parámetros biológicos en las lagunas

| Parámetro                                | 29/06/02             |                      | 04/09/2002        |                   |                   | Promedio                  |
|--|----------------------|----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------------------------|
|  | Laguna 1             | Laguna 3             | Laguna 3          | Laguna 4          | Laguna 5          |                           |
| <b>Coliformes totales</b><br>(ufc/100ml) | 2,94x10 <sup>5</sup> | 2,03x10 <sup>5</sup> | 1x10 <sup>4</sup> | 3x10 <sup>4</sup> | 6x10 <sup>4</sup> | <b>1,2x10<sup>5</sup></b> |
| <b>Coliformes fecales</b><br>(ufc/100ml) | 6,90x10 <sup>4</sup> | 4,10x10 <sup>4</sup> | 1x10 <sup>4</sup> | 2x10 <sup>4</sup> | 2x10 <sup>4</sup> | <b>3,2x10<sup>4</sup></b> |

En la Tabla N°6.23 se compara la normativa de riego con los parámetros biológicos de las lagunas, reflejándose en principio que el agua de las lagunas no cumple con dichas normas. Sin embargo, se conoce que el manejo sanitario de la granja busca velar por la salud de los animales de tal forma que ellos no se infecten con organismos patógenos, o que sean portadores de una enfermedad determinada, esto permite que dicha agua pueda emplearse como agua tipo 2B, aún cuando los valores obtenidos en organismos coliformes se encuentran por encima de los propuestos por la normativa. Además, las bacterias coliformes incluyen los géneros *Escherichia* y *Aerobacter* por lo que el uso de los coliformes como organismos indicadores es problemático debido a que *Aerobacter* y ciertas *Escherichia* pueden crecer en el suelo.

**Tabla N°6.23:** Comparación con la normativa de riego

| <b>Análisis</b>                             | <b>Laguna</b>       | <b>Decreto<br/>(agua de riego 2A)</b> | <b>Decreto<br/>(agua de riego 2B)</b> |
|---|---------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| <b>Coliformes Totales<br/>(NMP/100ml)</b>   | 1,2x10 <sup>5</sup> | Promedio mensual<br>menor a 1000      | Promedio mensual<br>menor a 5000      |
| <b>Coliformes Fecales<br/>(NMP/100ml)</b>   | 3,2x10 <sup>4</sup> | Promedio mensual<br>menor a 100       | Promedio mensual<br>menor a 1000      |
| <b>Sólidos Disueltos<br/>Totales (mg/l)</b> | 252                 | 300                                   | 300                                   |

Tipo 2A: Aguas para riego de vegetales destinados al consumo humano

Tipo 2B: Aguas para el riego de cualquier otro tipo de cultivo y para uso pecuario

## **6.5. SUBPRODUCTOS DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO**

Los subproductos biogas, bioabono y plantas acuáticas generados a partir del sistema de descontaminación con fines productivos determinan el funcionamiento y rentabilidad de dicho sistema. En la siguiente sección se discute acerca de la calidad y producción del biogas, composición del bioabono y contenido energético de las plantas acuáticas.

### **6.5.1. Biogas**

El biogas se ha definido como una mezcla de gases cuya composición varía de acuerdo a parámetros de operación como es la carga aplicada, tiempo de retención y la dilución. La composición del biogas procedente de la digestión anaerobia de los excrementos de animales es 50-70% CH<sub>4</sub>, 30-50 CO<sub>2</sub>, 1% H<sub>2</sub>S y 2% H<sub>2</sub>. En la Tabla N°6 24 se presenta los resultados obtenidos en los análisis del biogas captado a la salida del biodigestor en estudio.

**Tabla N°6.24:** Composición del biogas

| Composición (%)    | 29/06/02 | 19/07/02 | 04/09/02 | Promedio    |
|--------------------|----------|----------|----------|-------------|
|                    | POLAR    | INTEVEP  | INTEVEP  |             |
| Vapor de agua      | 9,6      | -        | -        | -           |
| Metano             | 62,24    | 70,53    | 60,97    | <b>64,6</b> |
| Dióxido de carbono | 28,16    | 28,49    | 26,28    | <b>27,6</b> |
| Oxígeno            | -        | -        | 2,34     | -           |
| Nitrógeno          | -        | -        | 10,29    | -           |

La composición del biogas obtenida para los diferentes ensayos se asemeja a la señalada por Hesse, 1983, donde la mayor proporción corresponde al metano, tal como se observa en la Tabla N°6.24, seguida por el dióxido de carbono.

En la determinación de sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ) se realizaron análisis en el laboratorio que se muestran en la Tabla N°6.25 y en campo como se observa en la Tabla N°6.26.

**Tabla N°6.25:** Análisis de  $H_2S$  en laboratorio

| Composición (ppm)               | 29/06/02              | 19/07/02                                |
|---------------------------------|-----------------------|---|
| <b>Institución</b>              | <b>INTEVEP</b>        |   |
| Sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ) | $1,25 \times 10^{-1}$ | $4,33 \times 10^{-2}$                   |
| COS                             | $5,82 \times 10^{-1}$ | -                                       |
| Metilmercaptano                 | $8,48 \times 10^{-1}$ | -                                       |
| Etilmercaptano                  | $7,32 \times 10^{-2}$ | $5,02 \times 10^{-2}$                   |
| Isopropilmercaptano             | $2,96 \times 10^{-1}$ | -                                       |
| Propilmercaptano                | $3,31 \times 10^{-2}$ | -                                       |
| Dimetildisulfuro                | $4,14 \times 10^{-2}$ | -                                       |
| $C_3$ Tiofenos                  | $5,06 \times 10^{-2}$ | -                                       |
| <b>Total</b>                    | <b>2,05</b>           | <b><math>9,35 \times 10^{-2}</math></b> |

**Tabla N°6.26:** Análisis de H<sub>2</sub>S en campo

| Composición (ppm)    | 19/07/02 | 04/09/02 |
|----------------------|----------|----------|
| Sulfuro de hidrógeno | 300      | 1600     |

El ión sulfato se presenta naturalmente en la mayoría de los suministros de agua y también en el agua residual. Los sulfatos a la entrada del biodigestor alcanzan un promedio de 191 mg/l. Los sulfatos son reducidos bioquímicamente a sulfuros y a sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S) por las bacterias en condiciones anaerobias. A la salida del digestor se tiene 35 mg/l de sulfatos, es decir, una reducción del 82% con respecto a la entrada. Adicionalmente, se encontró una elevada concentración de H<sub>2</sub>S en el biogas analizado. Para el mes de julio donde se manejaban 21 animales se obtuvo 300 ppm de H<sub>2</sub>S y en septiembre con 48 animales se alcanzó 1600 ppm de H<sub>2</sub>S, concentraciones que se relacionan con la disminución del ión sulfato.

Es importante señalar que las determinaciones de H<sub>2</sub>S antes reportadas, se hicieron en campo por factores concernientes a la naturaleza química de este compuesto, en particular la inestabilidad de la molécula ya que se transforma con facilidad en diversos compuestos azufrados, además para el análisis en el laboratorio se requiere de secado con el fin de eliminar la humedad presente, dado que la molécula de H<sub>2</sub>S se asemeja a la de H<sub>2</sub>O es su estructura geométrica. El H<sub>2</sub>S obtenido en el laboratorio presentó concentraciones mínimas en comparación a las de campo. Esta divergencia en resultados es producto de la metodología empleada para cada caso, por lo que se recomienda determinar H<sub>2</sub>S in situ.

La eliminación del sulfuro de hidrógeno presente en el gas se efectúa en forma eficiente haciéndolo pasar por una trampa formada simplemente por limadura de hierro oxidada al aire. Esta puede ser fácilmente regenerada exponiéndola al medio ambiente una vez que se ha saturado. El procedimiento anterior hace a este método accesible y económico [Olade, 1981].

En cuanto a la producción de biogas no se determinó el tiempo de llenado de éste para ocupar la fase gaseosa en el biodigestor, sin embargo, por datos suministrados se habla de 48 a 72 horas aproximadamente para llenar el biodigestor. Por otro lado, se determinó el volumen que ocupa el gas en el biodigestor actualmente, resultando  $17 \text{ m}^3$ , es decir, un 47 % del volumen total del biodigestor ( $36,4 \text{ m}^3$ ).

El volumen de la fase gaseosa y el tiempo de llenado permitieron calcular una producción aproximada de biogas. Por lo tanto, para un tiempo de llenado entre 2 y 3 días la producción de biogas resulta entre 8,5 y 5,7  $\text{m}^3/\text{día}$ , respectivamente. Según PDVSA GAS una familia convencional (cinco miembros) consume  $4 \text{ m}^3\text{gas}/\text{día}$ , de tal manera que el gas generado alcanza cubrir los requerimientos del Modelo Físico, donde se emplea básicamente para la cocción del grano de soya.

Adicionalmente, se tiene la calefacción de lechones y el gas para uso doméstico para el cual es necesario cuantificar el consumo total y así predecir si es suficiente el biogas generado, sin olvidar que la producción de gas está determinada por los parámetros de operación del biodigestor.

### **6.5.2. Bioabono**

El efluente biodigerido es un abono orgánico de mayor calidad, puesto que la descomposición anaerobia comparada con la descomposición de las excretas al aire libre, disminuye las pérdidas de nitrógeno como se señaló en el análisis del efluente del biodigestor. En la Tabla N°6.27 se aprecia un análisis realizado al bioabono generado a partir del proceso de digestión anaerobia.

**Tabla N°6.27:** Composición del bioabono

| <b>Bioabono</b>            | <b>Base Seca</b> | <b>Base Húmeda</b> |
|----------------------------|------------------|--------------------|
| Nitrógeno (g N/Kg muestra) | 39,70            | 23,10              |
| Fósforo (g P/Kg muestra)   | 3,125            | 1,813              |
| Potasio (g K/Kg muestra)   | 18,91            | 10,97              |

El nitrógeno es el nutriente presente en mayor proporción en el efluente biodigerido como se observa en la Tabla N°6.27, luego sigue el potasio y el fósforo en menor cantidad, ya que este se reduce en el biodigestor por razones ya mencionadas.

### 6.5.3. *Plantas acuáticas*

Las plantas acuáticas tienen la finalidad de reemplazar la proteína en la dieta de los cerdos y al mismo tiempo contribuyen a descontaminar el efluente proveniente del biodigestor. En la Tabla N°6.28 se presentan los análisis realizados a muestras compuestas por *Azolla* y *Lemna*.

**Tabla N°6.28:** Composición de las plantas acuáticas *Azolla* - *Lemna*

| <b>Composición (%)</b>             | <b>1999</b>    | <b>2000</b> |
|------------------------------------|----------------|-------------|
| <b>Institución</b>                 | <b>PROCRIA</b> | <b>UCV</b>  |
| <b>Materia seca</b>                | 89,4           | 89,4        |
| <b>Proteína cruda</b>              | 28,5           | 28,3        |
| <b>Grasa (extracto etéreo)</b>     | 7,8            | 2,6         |
| <b>Fibra</b>                       | 12,9           | 21,7        |
| <b>Cenizas</b>                     | 21,0           | 20,4        |
| <b>Extracto libre de nitrógeno</b> | 19,4           | -           |
| <b>Calcio</b>                      | 3,5            | 1,97        |
| <b>Fósforo</b>                     | 2,0            | 0,5         |

Comparando los resultados presentados en la Tabla N°6.28 se aprecia que el porcentaje de materia seca, proteína cruda y cenizas se asemejan en ambos análisis, mientras que los niveles de grasa, fibra, calcio y fósforo difieren. Estos ensayos fueron realizados para distintas fechas para las cuales las condiciones de las lagunas no eran las mismas.

La planta *Lemna minor*, conocida como lenteja de agua, absorbe bien el nitrógeno y llega alcanzar niveles de proteína de hasta un 38%. Este contenido proteico, su alta palatabilidad y facilidad de suministro la hacen ideal en la alimentación de los cerdos. Las lentejas de agua pueden cubrir la superficie de la laguna en cuatro días, además, presenta una alta producción anual, siendo está aproximadamente 19 ton/Ha.año de materia seca [Pinto, 2000]. En la Tabla N°6.29 se presenta un análisis realizado a la *Lemna* cosechada en el Modelo Físico.

**Tabla N°6.29:** Composición de la *Lemna*

| <b>Composición (%)</b>             | <b>1999</b>    |
|------------------------------------|----------------|
| <b>Institución</b>                 | <b>PROCRÍA</b> |
| <b>Materia seca</b>                | 88,0           |
| <b>Proteína cruda</b>              | 27,5           |
| <b>Grasa(extracto etéreo)</b>      | 10,7           |
| <b>Fibra</b>                       | 13,2           |
| <b>Cenizas</b>                     | 15,5           |
| <b>Extracto libre de nitrógeno</b> | 21             |
| <b>Calcio</b>                      | 2,1            |
| <b>Fósforo</b>                     | 1,6            |

La planta *Azolla* por sus altos contenidos de proteína cruda, calcio y aminoácidos, constituye un alimento promisorio en la alimentación animal. Según resultados obtenidos en trabajos previos, la *Azolla* puede aportar entre 20% y el 30% de la proteína cruda de la dieta de los cerdos, sustituyendo otras fuentes de proteína

de alto costo como lo es la harina de soya y de pescado, sin deteriorar la ganancia de peso de los cerdos en la etapa de crecimiento y finalización. En el caso de los animales monogástricos el factor que pudiera limitar su utilización como alimento es el alto nivel de fibra presentado.

Los niveles de fibra bruta son variables pues a medida que el cultivo de *Azolla* envejece aumenta el nivel de fibra y en especial de lignina; aumenta el nitrógeno asociado a la fibra y por lo tanto la digestibilidad de la materia seca y el nitrógeno se reducen significativamente. Sin embargo, en varias pruebas se encontró que el cerdo experimentaba mayor ganancia de peso en la fase de ceba al alimentarse con *Azolla*, esto se debe a una mayor capacidad digestiva de dicha planta en el cerdo y un menor requerimiento de aminoácidos. Por lo tanto, se debe alimentar con *Azolla* a partir de la edad de ceba, ya que antes su digestibilidad es menor. Por otro lado, la productividad de *Azolla* se encuentra en el ámbito de las 6 a 9 ton proteína/Ha.año, lo que equivale a 39 ton/Ha de materia seca [Querubín et al, 1986, citado por Pinto, 2000].

Al comparar la composición de la *Lemna* con la *Azolla* cosechadas en el Modelo Físico como se indica en las Tablas N°6.29 y 6.30, se observa que el porcentaje en materia seca y proteína cruda para cada análisis es prácticamente igual. Así mismo, el nivel de fibra y cenizas se asemejan en las dos plantas. La semejanza en composición de estas plantas posiblemente se deba a que ambas se cultivan en el mismo medio bajo iguales condiciones. Sin embargo, esta descripción es insuficiente para aportar una conclusión certera acerca de la composición de dichas plantas, por lo que se requiere de la realización de posteriores análisis de las plantas acuáticas cosechadas en el Modelo Físico.

**Tabla N°6.30:** Composición de la *Azolla*

| <b>Composición (%)</b>             | <b>1999</b>    |
|------------------------------------|----------------|
| <b>Institución</b>                 | <b>PROCRIA</b> |
| <b>Materia seca</b>                | 88,4           |
| <b>Proteína cruda</b>              | 27,2           |
| <b>Grasa (extracto etéreo)</b>     | 5,9            |
| <b>Fibra</b>                       | 12,5           |
| <b>Cenizas</b>                     | 17,0           |
| <b>Extracto libre de nitrógeno</b> | 25,7           |
| <b>Calcio</b>                      | 2,1            |
| <b>Fósforo</b>                     | 2,0            |

#### **6.6. CONSIDERACIONES EN EL MANEJO DEL BIODIGESTOR PLÁSTICO**

El biodigestor plástico representa un material el cual requiere de cuidados ya que el mismo es susceptible de sufrir daños que disminuyan su vida útil, en comparación de los digestores construidos en concreto u otro(s) material(s) de mayor resistencia los cuales no presentan esta desventaja. El biodigestor evaluado cuenta con un techado el cual permite atenuar el efecto de los rayos ultravioletas sobre el plástico. Por otro lado, la fosa del biodigestor está protegida con una cerca de cayena de manera de evitar la caída accidental de personas o animales sobre la superficie del mismo.

Sin embargo, el biodigestor plástico evaluado ya requiere su reemplazo. Se sugiere evaluar la posibilidad de sustituir dicho material bien sea por ladrillo, concreto, entre otros, que aunque significa una mayor inversión inicial es posible recuperar dicho capital en el tiempo. Estos últimos materiales ofrecen mayor vida útil lo cual favorece la sostenibilidad de la propuesta.

A las tanquillas de entrada y salida del biodigestor se les realiza mantenimiento periódicamente, a través de la remoción del volumen sedimentado; dicha tarea se realiza una vez a la semana. Con la misma frecuencia se chequea que las válvulas permanezcan cerradas cuando no se estén empleando, que no existan fugas por las diferentes conexiones y se verifica el nivel de agua contenido en la válvula de seguridad.

Otra tarea en el mantenimiento del biodigestor es el frote de la capa fibrosa formada en la superficie de la fase líquida, dicha capa esta constituida por el material no digerido por las bacterias; esta acción se realiza en el momento que se vacía el gas del biodigestor.

### ***6.7. ESTUDIO ECONÓMICO***

El sistema de descontaminación está integrado al sistema de producción de cerdos es por ello necesario conocer el balance económico de esta alternativa, pues una buena administración de los recursos implica ser competitivos. Es importante conocer los aspectos de carácter técnico con respecto al cerdo y su manejo, sin embargo, cómo y cuándo producir, dónde comprar y vender están relacionados como piezas importantes para mantenerse en el tiempo.

Una granja constituye una unidad física, administrativa y económica de producción que ocupa un espacio, que dispone de una determinada cantidad de recursos y es manejada por el hombre con una cierta tecnología, que junto a factores externos de carácter económico e institucional, determinan la forma de combinar u organizar tales recursos en un sistema de producción característico [Quevedo, 1972].

Con el fin de conocer la rentabilidad del sistema propuesto en el Modelo Físico se realizó el flujo de caja para los primeros 20 años de operación. El costo del

terreno no se considera en el presente análisis económico, suponiendo que el porcicultor es dueño del mismo. El análisis se realizó en dólares americanos por ser una moneda estable. Sin embargo, en el flujo de caja se consideró una inflación del 2% anual.

En el año cero, se tomó en cuenta sólo los costos de la inversión inicial o fija, los cuales constan de la construcción de la cochinería, el trapiche, la instalación del biodigestor, las lagunas, las campanas de calefacción, y las tuberías, tanto de agua como de gas.

Los costos de construcción de la cochinería, el trapiche, el biodigestor y lagunas fueron suministrados por el personal del Modelo Físico ATS. Estos fueron llevados a su valor presente. La cochinería ascendió a \$ 41.374,67, el trapiche a \$ 9.868,43, la instalación completa del biodigestor que incluye la fosa, el plástico, las tuberías, las tanquillas de entrada y salida por un monto de \$ 8.241,37 y el total de las lagunas a \$ 2.599,84. Por otra parte por existir dos corrales de cría son necesarias dos campanas para la calefacción de los lechones con un costo total de \$ 266,67.

La red de distribución de biogas está constituida por una manguera de PVC de 2" de diámetro y 100 m de longitud, suspendida a 2 m de altura, soportada con columnas de madera. Su función es suministrar biogas a la Vivienda Ecológica, los calentadores para lechones en la unidad de cerdos y la estufa de cocción de alimentos [Messa *et al*, s.f]. El costo total por dicha tubería es \$ 61,78.

Así mismo es necesario una tubería de PVC de 4" de diámetro, el eje principal del sistema alcanza una longitud de 22 m lineales y se adiciona a la distribución 24 m (tubos de 3 m lineales) para dirigir los efluentes [Messa *et al*, s.f]. El costo total de esta inversión es \$ 57,86.

Por último al sumar los costos de inversión inicial, se obtiene el total de egresos para el año cero, el cual alcanza \$ 62.470.

Posteriormente se tiene el costo de los egresos anuales que están conformados por:

- 1) Los insumos: agua, cal y alimentos de los cerdos.
- 2) Mantenimiento: veterinario, personal y compra de cochinos.

El consumo de agua anual es aproximadamente 300 m<sup>3</sup> con un costo de \$ 120. Anualmente se tiene un consumo de cal de 6 kg para evitar la entrada de microbios a la granja, teniendo un costo de \$ 1,73.

Dado que la finalidad de la granja es la reproducción y cría de cerdos, la población está compuesta por diferentes edades y tienen una permanencia variable en la granja, además de constituir una dieta particular para cada tipo de animal. Para el estudio económico se consideraron los siguientes grupos:

***Grupo 1: Las diez madres y el verraco.***

Las madres se reemplazan al cabo de dos años, tiempo en el cual han cumplido cuatro partos, número considerado favorable para la reproducción de los lechones/parto, tiempo mayor que éste, disminuyen la eficiencia. El verraco tiene una duración de tres años, pues un lapso mayor implica baja reproducción. Por ende éste grupo se vende al final de cada lapso de tiempo en tanto que se requiere comprar madres de reemplazo y un verraco.

Para el cálculo del costo de la dieta de estos animales se consideraron los 365 días del año, así como que las dietas de estos no varía en el tiempo, como se aprecia en las Tablas N°6.31 y 6.32, datos también proporcionados por el personal del Modelo Físico ATS. Para el año en el cual coincide el reemplazo del verraco y las

madres, se pueden emplear cerdas de la granja, las cuales no tienen consanguinidad con el cerdo, evitando la compra de ellas.

**Tabla N°6.31:** Dieta del Verraco

| <b>Alimento</b>       | <b>Consumo</b> |
|-----------------------|----------------|
| Soya                  | 0,4 Kg/día     |
| Vitaminas y minerales | 0,3 Kg/día     |
| Plantas acuáticas     | 6 Kg/día       |
| Jugo de caña          | 7,5 l/día      |

**Tabla N°6.32:** Dieta de una Cerda madre

| <b>Alimento</b>       | <b>Consumo</b> |
|-----------------------|----------------|
| Soya                  | 0,25 Kg/día    |
| Vitaminas y minerales | 0,25 Kg/día    |
| Plantas acuáticas     | 6 Kg/día       |
| Jugo de caña          | 8 l/día        |

### ***Grupo 2: Los lechones***

Los lechones al nacer permanecen con su madre 30 días en los cuales se alimentan de la leche materna. Sin embargo, se comienza a suministrar 15 días antes del destete 0,1 kg de pre-iniciador por lechón al día.

### ***Grupo 3: Destete***

Los lechones al separarse de su madre comienzan con una nueva dieta para la etapa del destete, la cual se puede observar en la Tabla N°6.33. Con esta dieta permanecen un mes y medio. Este arreglo alimentario se considera en el flujo de caja 45 días del año por dos camadas, cada una de doce lechones y el número de veces que

un grupo completa esta dieta. En el Tabla N°6.33 se tiene el consumo total del par de camadas.

**Tabla N°6.33: Destete**

| Alimento     | Consumo      |
|--------------|--------------|
| Iniciador    | 702 Kg       |
| Jugo de caña | 2.565 litros |

**Grupo 4.: Los Cerdos de ceba o engorde**

Estos consumen la dieta que se observa en la Tabla N°6.34 durante tres meses y medio, tiempo para el cual han cumplido 6 meses de vida, al finalizar este lapso han ganado un peso promedio de 90 kg/individuo apto para la venta. En la Tabla N°6.34 se aprecia el consumo total para 24 de cerdos de ceba.

**Tabla N°6.34: Cerdos de ceba**

| Alimento              | Consumo       |
|-----------------------|---------------|
| Soya                  | 2.520 Kg      |
| Vitaminas y minerales | 420 Kg        |
| Plantas acuáticas     | 280 Kg        |
| Jugo de caña          | 32.760 litros |

El costo de la alimentación en el Modelo Físico se realizó considerando los precios reportados en la Tabla N°6.35, los cuales fueron obtenidos a partir de diferentes comercios de alimentación agropecuarias.

**Tabla N°6.35: Precio de la alimentación de los cerdos**

| Alimento              | Costo       |
|-----------------------|-------------|
| Pre-Iniciador         | 1,23 \$/Kg  |
| Iniciador             | 0,457 \$/Kg |
| Soya                  | 0,25 \$/Kg  |
| Vitaminas y minerales | 0,92 \$/Kg  |
| Jugo de caña          | 0,03 \$/l   |

En las Tablas N°6.36 y 6.37 se observan el costo total anual, de la alimentación del verraco y las diez madres.

**Tabla N° 6.36:** Gasto anual de la alimentación del verraco

| <b>Alimento</b>       | <b>Gasto \$</b> |
|-----------------------|-----------------|
| Soya                  | 36,99           |
| Vitaminas y minerales | 101,03          |
| Jugo de caña          | 73,00           |
| <b>Sub-Total</b>      | <b>211,02</b>   |

**Tabla N° 6.37:** Gasto anual de la alimentación de las cerdas madres

| <b>Alimento</b>       | <b>Gasto \$</b> |
|-----------------------|-----------------|
| Soya                  | 231,17          |
| Vitaminas y minerales | 841,93          |
| Jugo de caña          | 778,70          |
| <b>Sub-Total</b>      | <b>1.851,80</b> |

Para el costo anual de la alimentación de los cerdos de venta se consideraron 24 partos al año, dos al mes. Además se considera el nacimiento de cerdos en el año uno partir del mes de mayo (en los meses anteriores las madres se encuentran en gestación) y en los años sucesivos el nacimiento todos los meses. Los gastos por alimentación de los cerdos de venta son los siguientes:

- Fase Cría: Para el año uno \$ 309,96 y a partir del año dos \$ 531,36.
- Destete: Para dos camadas los gastos en alimentos se aprecian en la Tabla N°6.38.

**Tabla N°6.38:** Gastos de alimentos en destete

| <b>Alimento</b>  | <b>Gasto Año 1<br/>(\$/año)</b> | <b>Gasto a partir del año 2<br/>(\$/año)</b> |
|------------------|---------------------------------|--|
| Iniciador        | 2.245,69                        | 3.101,21                                     |
| Jugo de caña     | 478,80                          | 661,20                                       |
| <b>Sub-total</b> | <b>2.724,49</b>                 | <b>3.762,40</b>                              |

- Fase engorde: Los gastos en la dieta de los cerdos de engorde se muestran en la Tabla N°6.39, con una duración de 105 días. La dieta de estos animales se considera en el primer año 3,28 veces y a partir del segundo año 8,28 veces en el flujo de caja, esto se debe a la suposición que al final de cada año se vende toda la producción y hay grupos de cerdos que no culminan esta fase antes de ser comercializados.

**Tabla N°6.39:** Gastos de alimentos en fase de engorde

| <b>Alimento</b>       | <b>Gasto Año 1<br/>(\$/año)</b> | <b>Gasto a partir del año 2<br/>(\$/año)</b> |
|-----------------------|---------------------------------|--|
| Soya                  | 2.093,95                        | 5.285,95                                     |
| Vitaminas y minerales | 1.273,61                        | 3.215,08                                     |
| Jugo de caña          | 2.865,41                        | 7.233,41                                     |
| <b>Sub-total</b>      | <b>6.232,97</b>                 | <b>15.734,44</b>                             |

Debido a que el año tiene doce meses y los periodos de permanencia de estos animales es de seis, desde su nacimiento, se tiene que para el primer año de flujo de caja se toman en cuenta: a) cuatro camadas que culminan la ceba (nacidos en mayo y junio), b) dos camadas nacidas en el mes de julio y para finales del año llevan un 71% de la fase de ceba o engorde, c) otro par de camadas nacidas en agosto con 43 % de la fase de ceba, d) dos camadas adicionales del 14% del periodo de ceba (nacidos en septiembre). Los cerdos nacidos en octubre tienen un mes con su madre y un mes de destete, y los nacidos en noviembre sólo se venden una vez destetados. Teniendo como costo total de alimentación para el primer año de \$ 11.376,97.

A partir del segundo año en adelante se toman en cuenta: a) doce camadas de ceba completa, siendo los cerdos nacidos desde enero hasta junio, b) dos camadas de 71% de engorde (nacidos en julio), c) otro par con 43% de ceba (nacidos en agosto), d) dos camadas con el 14% de la fase de ceba último periodo (nacidos en septiembre). Mientras los cerdos nacidos en octubre y noviembre están en la situación explicada anteriormente. Teniendo como costo total de alimentación para los años siguientes \$ 22.095,31.

Con respecto a la venta así como para la alimentación de los cerdos estos se toman en camadas. Tomándose en cuenta que mensualmente se venden animales después del mes de junio y al final de cada año se vende toda la producción, excepto los adultos, se tiene:

- ✓ En el primer año un total de ingresos por venta igual a \$ 15.420,8, distribuidos en Cuatro camadas, es decir, 48 cerdos con un peso 90 Kg cada cerdo y 96 cerdos con un peso promedio de 55 kg cada uno a un precio de 1,6 \$/kg. Además de dos camadas de lechones a 2,53 \$/por individuo.
- ✓ En los años venideros nacen 24 camadas con un total de ingresos por venta igual a 32.700,8 \$/año, distribuidos en 144 cerdos con un peso de 90 kg/individuo y otros 120 cerdos con un peso promedio de 55 kg cada uno a un precio de 1,6 \$/kg, además de 24 lechones a 2,53 \$ cada uno.

Otras ventas adicionales son las madres y verraco de descarte. Las madres de descarte tienen un peso aproximado de 200 kg. con un precio de 0,67 \$/kg, resultando un ingreso adicional de \$ 1.333,33. El verraco viejo se vende al mismo precio de descarte y un peso aproximado de 270 kg, haciendo una venta de \$ 180.

Por último en los costos de mantenimiento se tiene:

- Un veterinario con dos visitas al año, a un costo de 266,67 \$/anuales.
- Un empleado a medio tiempo con un sueldo mensual de \$ 106,7.

- Compra de 10 cerdas nuevas que se tienen que reemplazar a aproximadamente cada dos años a \$ 1.440, excepto en los años de verraco nuevo, cuando no se compran madres.
- El verraco nuevo de 160 kg se cotiza a \$ 256.

Empleando la información detallada se realiza el flujo de caja con las siguientes suposiciones.

- ✓ Todo lo que se produce se vende. A final de año se vende toda la producción, de diferente tamaño excepto los adultos.
- ✓ Todos los activos depreciables (trapiche y campana), tienen la misma vida útil de 20 años; excepto el biodigestor de 4 años, tiempo en el cual se debe reemplazar la bolsa.
- ✓ Se pagan impuestos desde el año de utilidad bruta positiva.
- ✓ Se considera una mortalidad de 15% en lactancia, es por ello que el número de cerdos es 12 individuos por camada.
- ✓ Consideraciones ideales de reproducción.
- ✓ Existe un estricto control sanitario en cuanto a enfermedades, parto y aseo de los lechones.
- ✓ Se consideran ventas de animales homogéneos en edad y peso, a fin de cumplir con el abastecimiento de aquellos clientes fijos.

En el flujo de caja están distribuidos los diferentes movimientos monetarios:

- ✓ El año cero es de instalación y construcción de la granja. No hay producción de cerdos.
- ✓ El subtotal de insumos es la suma de cal, agua y alimentación.
- ✓ El subtotal mantenimiento es la suma de los gastos por veterinario, personal y nuevos cochinos.
- ✓ El valor residual es el precio de venta de la granja sin el terreno, se consideró un 20% de inversión inicial. Este se considera en el año 20 al final de flujo de caja.

- ✓ El subtotal inversión, inversión fija o inversión inicial, es la suma de la construcción de la cochinería, y las lagunas, el costo de las campanas, el trapiche, el biodigestor y las tuberías de agua y gas.
- ✓ El total egresos año cero: es el sub total inversión.
- ✓ El total egresos año n: es la suma del sub total insumo y subtotal mantenimiento.
- ✓ Para los años 4, 8, 12, 16 y 20 el total egresos es la suma del subtotal insumo, el subtotal mantenimiento y 570 \$ por el restablecimiento de la bolsa del biodigestor. Debido que sólo se debe sustituir la bolsa, sin incurrir en gastos de tanquillas y fosas.
- ✓ Los activos depreciables son aquellos que pierden valor por su uso. Es la suma de las lagunas, las campanas, el trapiche, el biodigestor y tuberías.
- ✓ La depreciación lineal son los activos depreciables divididos entre 20 años de operación.
- ✓ La venta está representada por el dinero de ingreso del comercio de lechones, destetes y cerdos en crecimiento y ceba.
- ✓ Utilidad bruta es la venta menos el total de egresos y depreciación.
- ✓ Los impuestos es el 30 % de la utilidad bruta.
- ✓ La utilidad neta es la utilidad bruta más depreciación.
- ✓ Flujo de caja es la suma de la utilidad neta, la depreciación y el valor residual.
- ✓ Flujo de caja inflado es el flujo de caja al aplicarle un 2% de inflación en dólares.
- ✓ Flujo de caja acumulado es el flujo de caja del año n, más el flujo de caja del año n-1.

Por último se determinó como índices económicos el Valor Presente (VP), la Tasa Interna de retorno (TIR) y Tiempo de pago o de recuperación. Para una mayor comprensión mencionaremos su significado [Fabrycky, 1986]:

- *El VP* determina la rentabilidad de la propuesta. El valor presente es un cálculo que se basa en el concepto de un valor equivalente de todos los flujos de caja efectivo relativo a alguna base o punto de inicio en el tiempo

llamados presente, a una tasa específica de interés  $i$ , de manera que tiene en cuenta el efecto de tiempo sobre el valor de la moneda. Se calcula con la Tasa de Retorno Mínima Atractiva (TREMA). El valor fue positivo, implica que es rentable, siendo negativo es no rentable, y se determina con la ecuación 6.1.

$$Valor\ presente = \frac{\sum Flujo\ de\ caja\ para\ el\ año\ N}{(1+i)^N} \quad (6.1)$$

- *La TIR* es una tasa de interés que se obtiene cuando el valor presente de la inversión es igual a cero. En otras palabras la tasa interna de retorno consiste en igualar el valor equivalente de una alternativa de flujos de entrada de efectivo, al valor equivalente de flujos saliente de efectivo, es decir, es la tasa con la que el valor actual de los pagos de una inversión es exactamente igual al costo de la inversión. Se calcula con la ecuación anterior pero en este caso la variable a calcular es el interés, ya que el valor presente es cero.
- *Tiempo de pago o de recuperación* es la cantidad de tiempo requerido para recuperar el costo inicial de una inversión a partir de los flujos netos de caja producidos por ella. Una forma práctica de determinar el tiempo de pago es conocer el tiempo necesario para que el flujo de caja acumulado se haga cero o cambie de signo. El cambio de signo a positivo indica la existencia de ganancias recuperándose la inversión.

Con las consideraciones realizadas y una población en granja de 131 cerdos, se observa en la Tabla N°6.40 una ganancia anual que oscila entre \$ 6.520,65 y 7.927,65. Además la inversión se recupera en el séptimo año de operación. Para mayor descripción de los cálculos se pueden observar en el flujo de caja Anexo III. El valor presente se hizo positivo con una TREMA de 10,77%.

Debido a que la mayor cantidad de egresos es por la alimentación de cerdos, se realizaron dos análisis económicos adicionales: en el primero se halló el número mínimo de cerdos para el cual el sistema es rentable, empleándose esta misma dieta, y el segundo con una dieta basada con alimentos concentrados.

Se determinó con 107 cerdos rentabilidad positiva como se observa en la Tabla N°6.40, en comparación al flujo de caja anterior el tiempo de pago se realiza en el año 9 de operación.

Mientras en una granja convencional de 131 cerdos con alimentos concentrados y sistema de tratamiento lagunas anaerobia y facultativa, es rentable la producción, sólo sí se emplea una dieta promedio, pero al emplear alimento a satisfacción del animal, no es rentable, al menos para este número de animales. La inversión inicial se recupera en el año 10 de producción, con ganancias anuales entre \$ 3.895,26 y 4.903,26 como se muestra en la Tabla N°6.40.

El costo anual de alimentación del verraco con alimentos concentrados es de \$ 288,35, mientras el de las madres \$ 4.684,17. Adicionalmente el costo en alimentos para los cerdos de venta (lechones, destete y ceba) es para el año uno \$ 7.688,62 y a partir del año dos es \$ 20.388,56. Resultando un total anual de la alimentación año uno igual a \$ 13.336,67 y a partir del año dos \$ 25.361,08. (Las raciones de alimentos concentrados se determinó utilizando la sugerida en Taiganides).

Por lo tanto la alimentación de la granja convencional tiene un costo mayor que la del Modelo Físico, considerando los 131 cerdos.

Tabla N° 6.40. Índices económicos

| Índices económicos                   | Modelo Físico con<br>107 cerdos | Modelo Físico con<br>131 cerdos | Granja convencional<br>con 131 cerdos |
|--------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|
| VP (\$)                              | +                               | +                               | +                                     |
| TIR (%)                              | 7,13                            | 10,77                           | 6,80                                  |
| Tiempo de pago (año)                 | 9                               | 7                               | 10                                    |
| Rango de ganancia anual (\$)         | 2.659,82 – 6.549,97             | 6.520,65 – 7.927,65             | 3.895,26 – 4.903,26                   |
| Rango de ganancia anual (\$=1500 Bs) | 3.989.732 – 9.824.956           | 9.780.969 – 11.891.470          | 5.842.884 – 7.354.886                 |

Como resultado del análisis económico la importancia de la sostenibilidad de producción agropecuaria y la necesidad de mejorar la rentabilidad económica de esta actividad, hace necesario minimizar la dependencia de insumos convencionales, y aprovechar más los procesos naturales de manera de obtener fuentes alternativas de producción y reducir los costos, empleando la caña de azúcar, las plantas acuáticas y el biogas.

En los sistemas tradicionales de producción de cerdos, la alimentación depende exclusivamente de cereales y fuentes de proteínas como la soya. La producción de estos alimentos en el país es relativamente baja o inexistente. Finol (2002) señala que los rubros sobre los cuales se basa las raciones alimenticias tradicionales para cerdo, no rinden en los países tropicales desde el punto de vista agrícola y económico. Basar la alimentación humana y más la de los sistemas de producción animal sobre una producción vegetal importada atenta contra la seguridad alimentaria. Además el cerdo posee la capacidad de adaptarse fácilmente a diferente esquemas de manejo y alimentación. Los residuos que se generan en su producción son fuente valiosa para la generación de otros recursos aprovechables como biogas, bioabono y plantas acuáticas.

El sistema de producción aquí presentado esta dirigido a pequeños y medianos productores quienes cuentan con un terreno el cual pueden aprovechar. Aunque la

TREMA con la que se hizo el proyecto es de 10% es preferible trabajar esta alternativa y aprovechar sus ventajas en vez de estar desempleados o tener las tierras sin uso. Es el momento para incentivar la producción nacional, valorando y explotando recursos autóctonos, que conlleven a generar empleo, disminuyendo la fuga de divisas y culminando una ciega economía fundamentada en las importaciones hasta de productos que se generan en el país. La economía debe estar sustentada en un equilibrio de exportaciones e importaciones, y no en un desbalance de ellos, por lo tanto se requiere de una conciencia de producción.

## 7. CONCLUSIONES

Los análisis de los diferentes resultados obtenidos durante la evaluación del sistema de producción de cerdos bajo el enfoque de tratamiento y aprovechamiento de los efluentes generados en la granja permitieron concluir sobre su funcionamiento y rentabilidad. A continuación se presentan dichas conclusiones:

- La caracterización físico-química del efluente proveniente de la unidad de cerdos resultando la  $DBO_{5,20}$  promedio 12175 mg/l y la DQO 42567 mg/l, permitió definir a dicho líquido residual como altamente agresivo; demostrando la necesidad de manejo y tratamiento adecuado de tales desechos.
- El aporte unitario promedio de carga orgánica por cerdo fue de 92 g/cerdo\*día en  $DBO_{5,20}$  y 315 g/cerdo\*día en DQO. El elevado contenido de materia orgánica presente en el efluente de la granja estudiada en comparación a granjas convencionales se atribuye principalmente a la dieta manejada en el Modelo Físico de ATS.
- El peso total de la población de cerdos en la granja es mayor cuando se dispone de más animales de ceba o finalización. Las cerdas constituyen el mayor aporte unitario de peso; siendo la tasa de excreción de los lechones, destetes y hembras lactantes en función al peso vivo (PV) mayor que la de los restantes cerdos.
- La carga aplicada al biodigestor es baja con respecto a la cantidad de excretas considerada en el diseño del biodigestor plástico, en consecuencia se obtuvo un tiempo de retención elevado. Este resultado indica la disponibilidad del biodigestor plástico para manejar una mayor carga.

- En el biodigestor plástico se remueve en el orden de 98% en DBO<sub>5,20</sub> y 94% en DQO; además se genera biogas constituido por 65% de metano y 28% de dióxido de carbono.
- El biogas analizado reportó gran cantidad de sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S) entre 300 y 1600 ppm.
- La producción de biogas resultó entre 5,7 y 8,5 m<sup>3</sup>/día alcanzando cubrir los requerimientos del Modelo Físico donde se emplea básicamente para la cocción del grano de soya y la calefacción de lechones; para el gas doméstico es necesario cuantificar el consumo total y así predecir si es suficiente el biogas generado.
- El bioabono generado presenta 39,7 g Nitrógeno/Kg, 18,9 g Potasio/Kg y 3,13 g Fósforo/Kg en base seca, contribuyendo como complemento de abono en los cultivos asociados al sistema integrado.
- Las lagunas del Modelo Físico representan el medio donde se cosechan las plantas acuáticas (*Azolla* y *Lemna*) las cuales tienen la finalidad de suministrar proteína para la dieta de los cerdos.
- La carga aplicada a las lagunas evaluadas es 2,7 Kg DBO/Ha.día. La bibliografía recomienda una carga de DBO de 27,5 Kg/Ha.día en los sistemas con lentejas de agua, reflejándose una subutilización de dichas lagunas.
- Aún cuando la densidad de organismos coliformes es superior a la propuesta por la normativa para uso en riego, el agua generada puede ser utilizada en riego de cultivos no destinados al consumo humano y uso pecuario.
- Con las consideraciones realizadas y una población en granja de 131 cerdos, el Modelo Físico tiene una utilidad neta que oscila entre \$ 1.200 en el año 01 hasta

\$ 7.000 en los años venideros. La inversión se recupera en el séptimo año de operación. El valor presente se hizo positivo con una TREMA de 10%.

- El sistema de producción propuesto con 131 cerdos es más rentable que un sistema de producción convencional con igual número de animales.
- El aprovechamiento de los desechos mediante la generación de subproductos en el sistema de tratamiento integrado de efluentes y los recursos propios del trópico, como la caña de azúcar, benefician al sistema de producción de cerdos, considerándose dicha propuesta ambientalmente favorable, técnicamente factible, económicamente rentable y socialmente pertinente.

## **8. RECOMENDACIONES**

Una vez realizada la evaluación se presentan sugerencias que se consideran idóneas en pro del mejoramiento del sistema de producción evaluado. A continuación se mencionan dichas recomendaciones:

- La divulgación y promoción de los sistemas integrados, llevando el conocimiento a las comunidades en pro del mejoramiento de la calidad de vida e incentivo de la producción nacional.
- El mantenimiento de la población de cerdos en la granja es importante para el buen funcionamiento del sistema de tratamiento y en consecuencia en la rentabilidad de la propuesta.
- Evaluar la factibilidad económica de sustituir el plástico por otro material (ladrillo, concreto, otros), ya que ofrecen mayor vida útil pero significa una mayor inversión inicial.
- El sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ) es un compuesto inestable, por lo que se recomienda su determinación in situ (en campo).
- La eliminación del sulfuro de hidrógeno presente en el gas se efectúa en forma eficiente haciéndolo pasar por una trampa formada simplemente por limadura de hierro oxidada al aire. El procedimiento anterior hace a este método accesible y económico.
- En futuras caracterizaciones de efluentes porcinos se sugiere utilizar un inhibidor de nitrificación diferente al 2-dicloro-metil piridina, debido a interferencias en la determinación de la demanda última y la constante de velocidad de oxidación carbonácea.

---

**BIBLIOGRAFÍA**

- 1) ACP, CORNARE Y CORANTIOQUIA. “Manejo de Elementos de la Producción Porcina que Pueden Causar Efectos Ambientales”. Convenio de concertación para una producción más limpia en el sector porcícola y ambiental del Departamento de Antioquia. Medellín, 1997, 155 pp.
- 2) AN BUI XUAN. “The Impact of Low-Cost Polyethylene the Biodigestor on Small Farms in Vietnam”. Msc. Thesis. Univ. Uppsala, 1996. (Citado por Pérez J *et al*, 2002).
- 3) APHA; AWWA; WEF. “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater”. Ed. 20. Washington, D.C, 1998.
- 4) BASSO, L.; VIEITES, C. “Requerimientos, Alimentos y Raciones”. En: Producción porcina, estrategias para una actividad sustentable (Carlos vieites Edit.). Editorial Hemisferio Sur. Buenos Aires, Argentina, 506 pp. (Citado por Messa *et al*, s.f.)
- 5) BECERRA M. “Azolla - Anabaena: Un recurso valioso para la producción agropecuaria en el trópico”. CIPAV: Convenio Interinstitucional para la Producción Agropecuaria en el Valle del Río Cauca. s.f.
- 6) BECERRA, M. *et al*. “*Azolla filiculoides* as partial replacement for traditional supplements in diets for growing-fattening pigs based on Sugar Cane Juice”. Livestock Research for Rural Development, 1990, pág. 15-22.
- 7) CAICEDO, B. J. “Lenteja de agua para el Tratamiento de Aguas Residuales: Factores ambientales y físico – químicos que afectan su crecimiento”. Facultad de Ingeniería – Unible, Universidad del Valle – Colombia. Colombia, 2001.

- 8) CENTRAL SOYA CHEMURAY. (Citado por Morett, 1988).
- 9) CIPAV. “Descontaminación de Aguas Servidas en la Actividad Agropecuaria”. Cartilla. CIPAV, Cali, Colombia, 1998.
- 10) CHARÁ, J. “El Potencial de las Excretas Porcinas para Uso Múltiple y los Sistemas de Descontaminación Productiva”. Seminario sobre Instalación y mantenimiento del Biodigestor de plástico de flujo continuo, Memorias, Guanare, Venezuela, 1999.
- 11) CHARÁ, J., CONDE, N. Y PEDRAZA, G. “Montaje y Evaluación de un Sistema de Descontaminación de Aguas Basado en Organismos y Plantas Acuáticas”. Informe final Proyecto Ecofondo. CIPAV, 1997.
- 12) CRITES RON y TCHOBANOGLIOUS G. “ Sistemas de Manejo de Aguas Residuales Para Núcleos Pequeños y Descentralizados”. Tomo II. Mc Graw Hill. Colombia, 2000.
- 13) CULLIMORE, D. y MANSUNG N. “Ambient Temperature Methanogenesis from Pig Manure Waste Lagoons: Thermal Gradient Incubator Studies”. 1985. (Citado por Pérez J. *et al*, 2002).
- 14) DOELLE, H. W., “Socio – Economic Microbial Process Strategies for a Sustainable Development Using Enviromentally Clean Technologies. Renewable Resource: Sagopalm”. Editors: Eng – Leong Foo & Tarcisio Della Senta. 1998. (Citado por Silva V, 2000).

- 
- 15) DUQUE, R. “Concepto de Sostenibilidad”. En memorias Curso – taller de Gestión para la Sostenibilidad en Programas de Abastecimiento de Agua y Saneamiento. Cali, Colombia Cinara – IRC, 1996. (Citado por Silva V, 2000).
- 16) ESPINEL R Y SOLARTE L. “Biodigestor Plástico de Flujo Continuo, Generador de Gas y Bioabono a Partir de Aguas Servidas”. CIPAV. Cali, Colombia, 1995.
- 17) EDICIONES CENDIGRANJA. “Manual de Instalación y Mantenimiento del Biodigestor Plástico de Flujo Continuo” 1º Versión. Guanare, 1999.
- 18) FABRYCKY, W. J. y THUESEN. H.G. “Ingeniería Económica”. Editorial Prentice Hall. México, 1986.
- 19) FAO. “Agriculture Towards 2000”. Document C93/24. FAO, Rome November, 1993. (Citado por Preston R. y Rodriguez L, 1997).
- 20) FIGUEROA VILDA. “Producción Porcina con Cultivos Tropicales y Reciclaje de Nutrientes”. Federación Venezolana de Porcicultura – Feporcina; Asociación de Productores de Cerdos del estado Yaracuy – APROCEY y Fundación para la Investigación Agrícola – DANAC – Fundación POLAR. Maracay, Venezuela, 1999.
- 21) FINOL M. “Evaluación de las Unidades de Producción Porcinas en los Municipios Santos Michelena y José Rafael Revenga del Estado Aragua”. Tesis de Grado Ingeniero Agrónomo. UCV, Facultad de Agronomía, Maracay, Venezuela, 2000.
- 22) GACETA OFICIAL DE LA REPÚBLICA DE VENEZUELA, N° 5021 Extraordinaria, 1995. “Normas Sobre Vertidos Líquidos”, DECRETO 883.

- 
- 23) GALVIS, G., *et al.* “En la Búsqueda de Soluciones Sostenibles”. Artículo en el libro “Technology Transfer in the Water Supply and Sanitation Sector: A experience from Colombia”. Documentos técnicos del IRC, The Hague, The Netherlands. (Citado por Silva V, 2000).
- 24) GAUDY A. Y GAUDY E. “ Microbiology for Environmental Scientists and Engineers”. McGraw-Hill Book Company. New York, USA, 1980.
- 25) GIJZEN, H. “Anaerobic and Integrated Wastewater Treatment Systems”. Conferencia dictada en la Universidad del Valle, Colombia. Dic. 7 de 1996. (Citado por Chará, 1999).
- 26) GUNNERSON, C. “Anaerobic Digestion: Principles and Practices for Biogas System” The World Bank Technical Paper 19. Washington 1986. (Citado por Pérez J. *et al*, 2002).
- 27) HESSE, P. “Project field” Document N. 23. Storage and transport of biogas, 1983. (Citado por Pérez J. *et al*, 2002).
- 28) HOLDRIDGE, L. “Ecología Basada en Zonas de Vida”. IICA, Serie de Libros y Materiales Educativos N° 34. San José, Costa Rica, 1987. (Citado por Messa *et al*, s.f).
- 29) KENEALY, W “Application Bacteriology”. Nueva York, 1981. (Citado por Pérez J. *et al*, 2002).
- 30) LAU-WONG, M. “Studies on the Dynamics of Biogas Processes”. Biogas Forum. Canadá 1986. (Citado por Pérez J. *et al*, 2002).

- 
- 31) LEWIS, C.W. "Biotechnological Practices in Integrated Rural Development". In *Microbial Technology in the Developing World*. Pp. 51-86, Oxford Univ. Press. (Citado por Silva V, 2000).
- 32) LIVING WATER, 1996. "Ecological Design Principles for Pond and Wetlands Based Systems". Edinburgo, 1996. (Citado por Chará, 1999).
- 33) LOBER, G. "Agricultural waste management". Academic Press. Bull FAO Agric. Services. Rome 1974. (Citado por Pérez J. *et al*, 2002).
- 34) LUMPKIN T A Y PLUCKNET T L. "Azolla for Agriculture in the Americas". Prepared for The Interamerican Development Bank, Washington, DC, 1980.
- 35) LUMPKIN T A Y PLUCKNET T L. "Azolla as a Green Manure: Use and Management in Crop Production". Westview Press Boulder, Colorado. Westview Tropical Agriculture, Series #15. 230p. 1982. (Citado por Becerra Maricel *et al*, s.f.).
- 36) MARCHAIN, U. "Biogas processes for sustainable development". Rome, 1992. (Citado por Pérez J. *et al*, 2002).
- 37) MENDONÇA, SÉRGIO. "Sistemas de Lagunas de Estabilización." Editorial Mc Graw Hill. Colombia, 2000.
- 38) MESSA, H., RUIZ-SILVERA C. PINTO-SANTINI. "Dinámica de Funcionamiento y Resultados de un Sistema de Producción de Cerdos Bajo Enfoques de Integración y Sostenibilidad". FUNDACIÓN POLAR, San Javier Estado Yaracuy .s.f.

- 
- 39) METCALF & EDDY. “Ingeniería Sanitaria: Tratamiento, Evacuación y Reutilización de Aguas Residuales”. Segunda Edición. Madrid, España, 1985.
- 40) MEZONES O. y PALACIOS J. “Caracterización de los Efluentes Líquidos Provenientes de una Granja Porcina y Estudio de Posibilidades para su Tratamiento”. Trabajo Especial de Grado, Facultad de Ingeniería, Esc. de Ing. Química, UCV, Caracas, 1986.
- 41) MORETT, E. “La Soya un cultivo necesario”. FUNDACIÓN POLAR. p.54. Caracas, Venezuela, 1988.
- 42) MUÑOZ-MAROTTA-LAGRECA-ROUCO. “Porcinotecnia Práctica y Rentable”. Grupo Luzán 5, S.A. Madrid, España, 1998.
- 43) ODEHNAL J. F. *et al.*, “ Memoria Descriptiva, Granja Porcina Hato Baranda, Sistema de Tratamiento de Aguas Servidas”, Caracas. (Citado por Mezones y Palacios, 1985).
- 44) OES A. “The Assimilation of Free Nitrogen Through *Azolla*”. In: Endeavour 35 (124): 39 – 43, 1976.
- 45) OLADE. “Manual de Biogas. Primer Curso Latinoamericano de Biogas”. Volumen I y II. Organización Latinoamericana de Energía. Secretaria de Minería, Hidrocarburos y Energía Nuclear Guatemala, C.A. Guatemala, del 4 al 15 de mayo de 1981.
- 46) PEDRAZA, G. Y CHARÁ, J. “Aspectos Técnicos y Conceptuales en la Descontaminación Productiva de Aguas”. En: Memorias del V Seminario - Taller Internacional en Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria - CIPAV. Cali, 31 Julio a 3 agosto de 1997.

- 47) PÉREZ J., QUINTERO J., ROHL J. Y VELASCO N. “Diseño del Sistema de Tratamiento de las Aguas Residuales Provenientes de una Granja Porcina”. Cátedra Diseño. Escuela de Ing. Química. UCV. Caracas, Venezuela, 2002.
- 48) PETERS G A.; TOIA R E JR.; EVANS W R.; CRIST D K.; MAYNE B C y POOLE R. E. “Characterization and Comparisons of Five N<sub>2</sub> Fixing *Azolla* – *Anabaena* associations. J. Optimization of Growth Conditions for Biomass Increase and N Content in a Controlled Environment”. Blackwell Scientific Publications. USA Volum 3: p 261, 1980.
- 49) PINTO S. LIVIA V. “Producción de las Plantas Acuáticas *Lemna minor* y *Azolla filiculoides* y su Uso Conjuntamente con Harina de Pescado en Raciones para Cerdo” Tesis de Grado Ingeniero Agrónomo. Facultad de Agronomía, UCV. Maracay, Venezuela, Junio 2000.
- 50) POLPRASERT C. “Organic Waste Recycling”. Asian Institute of Technology. Bangkok. John Wiley & Sons London. 1989. 357p. (Citado por Chará, 1999).
- 51) PRESTON R. Y RODRIGUEZ L. “Alimentación de Cerdos Criollos con Recursos Locales”. Experiencias en el Sureste de Asia con Jugo de Caña, *Lemna minor* y Hoja Ensilada de la Yuca. Finca Ecológica, University of Tropical Agriculture Thu Duc District, Ho Chi Minh City, Vietnam. 1997.
- 52) QUEVEDO, R. “Análisis Económico de las Granjas Porcinas de la Zona Central de Venezuela”. Revista de la Facultad de Agronomía de la Universidad Central de Venezuela. Maracay, Venezuela, 1972.
- 53) REBOLLEDO D. Y LÓPEZ A., “ Diagnóstico de la Infraestructura de una Granja Porcina y Caracterización Físico-Química de los Efluentes”. Trabajo Especial de

- Grado, Facultad de Agronomía, UCV, 1982 (Citado por Mezones y Palacios, 1985).
- 54) RIVAS, G. “Tratamiento de Aguas Residuales”. 2da. Edición. Ediciones Vega. Madrid, España, 1978.
- 55) RUBIO M, A. “Evaluación Sanitaria y Energética de un Digestor Modelo Chino”. Trabajo Especial de Grado, Facultad de Agronomía. UCV, Maracay, 1992.
- 56) ROMERO, J. “Tratamiento de Aguas Residuales. Teoría y Principios de Diseño”. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. Santafé de Bogotá, Colombia, 1999.
- 57) SASSE, L. “Use of Digested Slurry from Biogas Plants”. 1986. (Citado por Pérez J. *et al*, 2002).
- 58) SCHIMND, L. y LIPPER, R. “Swine Waste, Characterization and Anaerobic Digestion”. 1969. (Citado por Pérez J. *et al*, 2002).
- 59) SCRIBAN, R. “Bioclima Tologie”. París 1982. (Citado por Pérez J *et al*, 2002).
- 60) SILVA F., PABLO G. “ Evaluación de un Digestor para Efluentes Porcinos con Fines de Saneamiento y Producción de Energía”. Tesis de Grado Ingeniero Agrónomo. Facultad de Agronomía, UCV. Maracay, Venezuela, 1991.
- 61) SILVA V., JUAN P. “ Sostenibilidad de Sistemas Integrados para el Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas”. Universidad del Valle – Facultad de Ingeniería. Departamento de Procesos Químicos y Biológicos. Colombia, 2000.
- 62) SOLARTE ANTONIO. “Los Biodigestores Plásticos para la Producción de Energía Renovable en el Trópico”. Memorias del Seminario Taller “Sistemas

- intensivos para la producción animal y de energía renovables con recursos tropicales”. CIPAV Convenio Interinstitucional para la Producción Agropecuaria del Valle del río Cauca (Susana López, T R Preston y Mauricio Rosales; editores) 1988, p 105-115.
- 63) TAIGANIDES, E. PÉREZ, R. y SÁNCHEZ E. “Manual para el Manejo y Control de Aguas Residuales y Excretas Porcinas en México”. Consejo Mexicano De Porcicultura. México, 1996.
- 64) TAIGANIDES, E. P. “Characteristics and Treatment of Wastes from Confinement Hog Production Unit”, Ph. D. Thesis, Ames, IA, Iowa, 1963. 177pp.
- 65) TURZO, E. “Estudio del Tiempo de Retención y de Sinergia de Deyecciones de Ganado en el Proceso de Fermentación Anaerobia”. Instituto Nacional de Investigación Agraria. Madrid, 1984. (Citado por Pérez J. *et al*, 2002).
- 66) VAN HOVE C Y LÓPEZ Y. “Fisiología de *Azolla*”. In: Boletín técnico, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Palmira. Volumen 1, Number 1. P. 43-58, 1983.
- 67) WERNER U. “Biogas Plants in Animals Husbandry”. Germany 1989. (Citado por Pérez J. *et al*, 2002).
- 68) YOUNGFU, F. “The Biogas Technology in China” Agricultural Pub-House. (Citado por Pérez J. *et al*, 2002).

## ANEXO I

### **DEMANDA ÚLTIMA DE OXÍGENO TOTAL (DeT), DEMANDA ÚLTIMA CARBONÁCEA DE OXÍGENO (L), Y LAS CONSTANTES DE VELOCIDAD DE OXIDACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA**

A continuación se presentan los valores obtenidos de demanda última total de oxígeno (DeT), demanda última carbonácea de oxígeno (L), y las constantes de velocidad de oxidación:  $k_{OT}$  y  $k_{10}$ , correspondiente a DeT y L, respectivamente. Calculados por los métodos: Fujimoto (A), Thomas (B) y Mínimos Cuadrados (C).

**AI. Afluente del Biodigestor** Se analizó el afluente del biodigestor en dos estudios, los cuales son:

**AI.Ia. Afluente Primer Estudio:** En la Tabla N°AI, se encuentran los valores correspondientes a DeT y L, producto del balance de masa entre agua de lavado y excretas. Los valores de las constantes de oxidación ( $k_{OT}$  y  $k_{10}$ ), de agua de lavado y excretas se muestran en las Tablas N° AII y AIII, con su respectiva correlación.

**Tabla N°AI:** Demanda última de oxígeno en la entrada del biodigestor

|            | 26/01/02 |       |       | 23/02/02 |       |       | 27/04/02 |       |       |
|------------|----------|-------|-------|----------|-------|-------|----------|-------|-------|
| Muestra    | A        | B     | C     | A        | B     | C     | A        | B     | C     |
| DeT (mg/l) | 10717    | 12350 | 10879 | 12827    | 14872 | 12785 | 11891    | 14009 | 12087 |
| L (mg/l)   | 9531     | 10495 | 9821  | 10351    | 12232 | 10354 | 11287    | 13132 | 11521 |

**Tabla N°AII:** Constante de velocidad de oxidación (agua de lavado)

| Parámetro              | Muestra                       | 26/01/02 |       |       | 23/02/02 |       |       | 27/04/02 |       |       |
|------------------------|-------------------------------|----------|-------|-------|----------|-------|-------|----------|-------|-------|
|                        |                               | A        | B     | C     | A        | B     | C     | A        | B     | C     |
| Constante de velocidad | $k_{OT}$ (día <sup>-1</sup> ) | 0,211    | 0,147 | 0,152 | 0,107    | 0,098 | 0,122 | 0,150    | 0,128 | 0,178 |
|                        | $k_{10}$ (día <sup>-1</sup> ) | 0,150    | 0,132 | 0,116 | 0,135    | 0,100 | 0,139 | 0,196    | 0,133 | 0,226 |
| Correlación            | $k_{OT}$                      | 0,973    | 0,995 | 0,880 | 0,968    | 0,985 | 0,857 | 0,893    | 0,978 | 0,726 |
|                        | $k_{10}$                      | 0,997    | 0,994 | 0,927 | 0,997    | 0,994 | 0,981 | 0,997    | 0,983 | 0,986 |

**Tabla N°AIII:** Constante de velocidad de oxidación (excretas + agua)

| Parámetro              | Muestra                       | 26/01/02 |       |       | 23/02/02 |       |       | 27/04/02 |       |       |
|------------------------|-------------------------------|----------|-------|-------|----------|-------|-------|----------|-------|-------|
|                        |                               | A        | B     | C     | A        | B     | C     | A        | B     | C     |
| Constante de velocidad | $k_{OT}$ (día <sup>-1</sup> ) | 0,149    | 0,095 | 0,564 | 0,086    | 0,065 | 0,077 | 0,158    | 0,110 | 0,108 |
|                        | $k_{10}$ (día <sup>-1</sup> ) | 0,167    | 0,125 | 0,114 | 0,129    | 0,082 | 0,109 | 0,133    | 0,093 | 0,089 |
| Correlación            | $k_{OT}$                      | 0,57     | 0,943 | 0,845 | 0,978    | 0,970 | 0,729 | 0,969    | 0,995 | 0,778 |
|                        | $k_{10}$                      | 0,995    | 1,000 | 0,804 | 0,996    | 0,979 | 0,920 | 0,997    | 0,994 | 0,736 |

*AI.Ib. Afluente Segundo Estudio:* En la Tabla N°AIV, se encuentran los valores correspondientes a DeT, L,  $k_{OT}$  y  $k_{10}$ , obtenidos en muestreos totales con su respectiva correlación.

**Tabla N°AIV:** Demanda última de oxígeno y constante de velocidad de oxidación en la entrada del biodigestor

| Parámetro              | Muestra                       | 29/06/02 |       |       | 04/09/02 |       |       |
|------------------------|-------------------------------|----------|-------|-------|----------|-------|-------|
|                        |                               | A        | B     | C     | A        | B     | C     |
| Demanda última         | DeT (mg/l)                    | 21637    | 23631 | 21377 | 27602    | 31300 | 27642 |
|                        | L (mg/l)                      | 20410    | 21625 | 19668 | 26045    | 30009 | 25971 |
| Constante de velocidad | $k_{OT}$ (día <sup>-1</sup> ) | 0,088    | 0,087 | 0,099 | 0,122    | 0,101 | 0,125 |
|                        | $k_{10}$ (día <sup>-1</sup> ) | 0,069    | 0,090 | 0,093 | 0,124    | 0,098 | 0,131 |
| Correlación            | $k_{OT}$                      | 0,999    | 0,993 | 0,990 | 0,987    | 0,993 | 0,906 |
|                        | $k_{10}$                      | 0,999    | 0,952 | 0,826 | 0,990    | 0,980 | 0,929 |

*AII. Efluente del Biodigestor:* En la Tabla N°AV, se encuentran los valores correspondientes a DeT, L,  $k_{OT}$  y  $k_{10}$ , obtenidos en el análisis de la salida del digestor anaerobio, con su respectiva correlación.

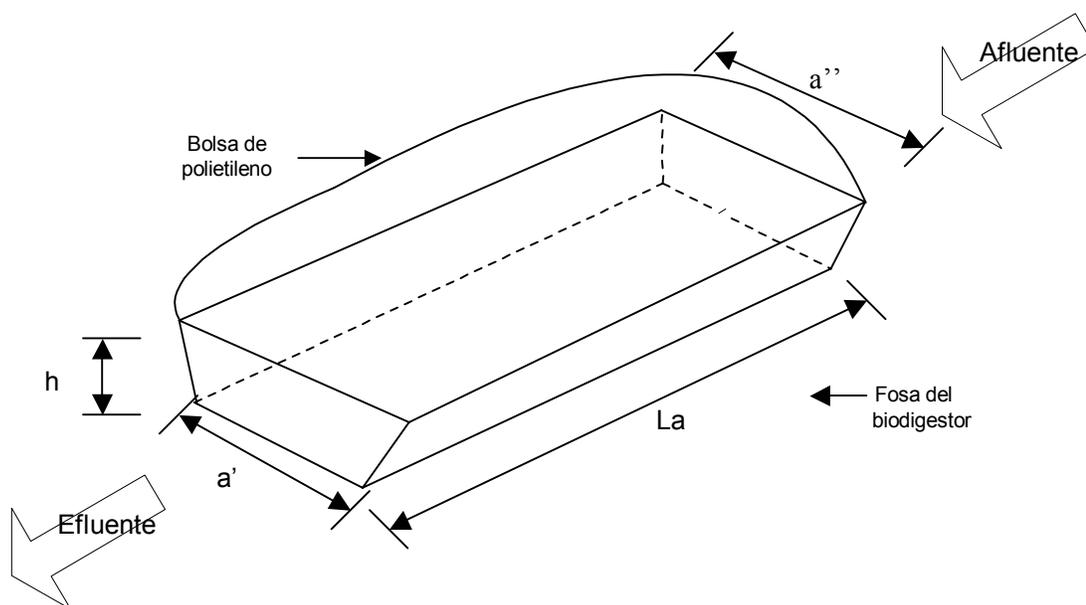
**Tabla N°AV:** Demanda última de oxígeno y constante de velocidad de oxidación en la salida del biodigestor

| Parámetro              | Métodos                       | 26/01/2002 |       |       | 23/02/2002 |       |       | 27/04/2002 |       |       | 29/06/2002 |       |        | 19/07/2002 |       |        | 04/09/2002 |       |       |
|------------------------|-------------------------------|------------|-------|-------|------------|-------|-------|------------|-------|-------|------------|-------|--------|------------|-------|--------|------------|-------|-------|
|                        |                               | A          | B     | C     | A          | B     | C     | A          | B     | C     | A          | B     | C      | A          | B     | C      | A          | B     | C     |
| Demanda última         | DeT (mg/l)                    | 1060       | ND    | 1267  | 514        | 590   | 514   | 389        | 381   | 384   | ND         |       |        | 354        | 389   | 354    | 577        | 516   | 527   |
|                        | L (mg/l)                      | 261        | 288   | 277   | 452        | 504   | 459   | 149        | 168   | 152   | 206        | 205   | 203    | 217        | 274   | 219    | 391        | 433   | 385   |
| Constante de velocidad | $k_{OT}$ (día <sup>-1</sup> ) | 0,068      | ND    | 0,047 | 0,121      | 0,090 | 0,121 | 0,047      | 0,065 | 0,054 | ND         |       |        | 0,087      | 0,095 | 0,088  | 0,042      | 0,072 | 0,058 |
|                        | $k_{10}$ (día <sup>-1</sup> ) | 0,137      | 0,103 | 0,092 | 0,109      | 0,080 | 0,098 | 0,128      | 0,085 | 0,108 | 0,045      | 0,052 | 0,049  | 0,284      | 0,145 | 0,239  | 0,096      | 0,100 | 0,115 |
| Correlación            | $k_{OT}$                      | 0,925      | ND    | 0,198 | 0,994      | 0,990 | 0,962 | 0,977      | 0,877 | 0,443 | ND         |       |        | 0,989      | 0,968 | 0,9692 | 0,992      | 0,914 | 0,590 |
|                        | $k_{10}$                      | 0,995      | 0,997 | 0,741 | 0,992      | 0,983 | 0,823 | 0,985      | 0,965 | 0,813 | 0,998      | 0,958 | 0,8716 | 0,980      | 0,977 | 0,940  | 0,994      | 0,982 | 0,896 |

ND: No determinado.

**ANEXO II**  
**CÁLCULO DEL VOLUMEN DEL BIODIGESTOR**

El biodigestor está conformado por una fracción de materia sólida – líquida donde ocurre la biodigestión y otra donde se almacena el biogas. Ambas se determinaron en campo, considerando la Figura N°A1.



**Figura N°A1: Biodigestor**

**III.I. - Volumen de biodigestión**

Este parámetro se determinó con el fin de conocer el tiempo hidráulico del biodigestor.

$$V_{bio} = \left( \frac{a'' + a'}{2} \right) * h * L_a \quad (3)$$

Donde:

$V_{bio}$ : Volumen de biodigestión en el biodigestor (m<sup>3</sup>).

$a''$ : Ancho superficial de la fosa del biodigestor (m).

$a'$ : Ancho en el fondo de la fosa del biodigestor (m).

$h$ : Profundidad de la fosa (m).

$L_a$ : Longitud de la fosa (m).

### ***AII.II.- Volumen que ocupa el biogas en el biodigestor***

$$V_{gas} = L_a * \frac{(P_{1/2})^2}{2 * \pi} \quad (4)$$

Donde:

$V_{gas}$ : Volumen de biogas en el biodigestor (m<sup>3</sup>).

$P_{1/2}$ : Perímetro superficial de la bolsa (m).

### ***AII.III.- Volumen del biodigestor***

Es el volumen funcional tanto sólido-líquido y gaseoso.

$$V = V_{bio} + V_{gas}$$

Donde:

$V$ : Volumen del biodigestor (m<sup>3</sup>).

***ANEXO III******FLUJOS DE CAJA***

A continuación se presentan los flujos de caja obtenidos en el estudio económico, considerando los costos de inversión inicial, egresos e ingresos.

***AIII.I.*** Se muestra en la Tabla N°AVI el Flujo de caja del Modelo con 131 cerdos, empleando las consideraciones y suposiciones descritas en la discusión de resultados.

***AIII.II.*** Se observa en la Tabla N°AVII el Flujo de caja del Modelo con 107 cerdos, número mínimo para obtener ganancias monetarias empleando las consideraciones y suposiciones de la discusión de resultados.

***AIII.III.*** En la Tabla N°AVIII se indica el Flujo de caja de una granja de cerdos, empleando una dieta basada en alimentos concentrados o convencional, empleando 131 individuos, empleando las consideraciones y suposiciones mencionadas anteriormente.

Tabla N°AVI: Flujo de caja del Modelo Físico con 131 cerdos

| Año   | 0<br>2002          | 1                   | 2<br>2004            | 3<br>2005            | 4<br>2006            | 5<br>2007            | 2008                 |
|---|--------------------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| <b>Insumos</b>                              |                    |                     |                      |                      |                      |                      |                      |
| Cal (\$)                                    |                    | (1,73)              | (1,73)               | (1,73)               | (1,73)               | (1,73)               | (1,73)               |
| Agua (\$)                                   |                    | (120,00)            | (120,00)             | (120,00)             | (120,00)             | (120,00)             | (120,00)             |
| Alimentación (\$)                           |                    | (11.376,97)         | (22.095,31)          | (22.095,31)          | (22.095,31)          | (22.095,31)          | (22.095,31)          |
| <b>Sub total insumo (\$)</b>                |                    | <b>(11.386,57)</b>  | <b>(22.104,91)</b>   | <b>(22.104,91)</b>   | <b>(22.104,91)</b>   | <b>(22.104,91)</b>   | <b>(22.104,91)</b>   |
| <b>Costo de mantenimiento</b>               |                    |                     |                      |                      |                      |                      |                      |
| Veterinario (\$)                            |                    | (266,67)            | (266,67)             | (266,67)             | (266,67)             | (266,67)             | (266,67)             |
| Personal (\$)                               |                    | (1.280,00)          | (1.280,00)           | (1.280,00)           | (1.280,00)           | (1.280,00)           | (1.280,00)           |
| Nuevos Cochinos (\$)                        |                    | (1.696,00)          | (1.440,00)           | 0,00                 | (256,00)             | 0,00                 | 0,00                 |
| <b>Sub total mantenimiento</b>              |                    | <b>(3.242,67)</b>   | <b>(2.986,67)</b>    | <b>(1.546,67)</b>    | <b>(1.802,67)</b>    | <b>(1.546,67)</b>    | <b>(1.546,67)</b>    |
| Valor residual (\$)                         |                    |                     |                      |                      |                      |                      |                      |
| <b>Inversión Fija</b>                       |                    |                     |                      |                      |                      |                      |                      |
| Construcción cochinería (\$)                | (41.374,67)        |                     |                      |                      |                      |                      |                      |
| Lagunas (\$)                                | (2.599,84)         |                     |                      |                      |                      |                      |                      |
| Campanas (\$)                               | (266,67)           |                     |                      |                      |                      |                      |                      |
| Trapiche (\$)                               | (9.868,34)         |                     |                      |                      |                      |                      |                      |
| Biodigestor (\$)                            | (8.241,37)         |                     |                      |                      | (570,00)             |                      |                      |
| Tubería agua (\$)                           | (57,86)            |                     |                      |                      |                      |                      |                      |
| Tubería gas (\$)                            | (61,78)            |                     |                      |                      |                      |                      |                      |
| <b>Sub-total inversión (\$)</b>             | <b>(62.470,53)</b> |                     |                      |                      |                      |                      |                      |
| <b>Total egresos (\$)</b>                   | <b>(62.470,53)</b> | <b>(14.741,37)</b>  | <b>(25.203,71)</b>   | <b>(23.763,71)</b>   | <b>(24.589,71)</b>   | <b>(23.763,71)</b>   | <b>(23.763,71)</b>   |
| Depreciación (\$)                           |                    | 1.054,79            | 1.054,79             | 1.054,79             | 1.054,79             | 1.054,79             | 1.054,79             |
| Venta (\$)                                  | 0,00               | 15.420,80           | 34.034,13            | 32.700,80            | 34.214,13            | 32.700,80            | 34.034,13            |
| Utilidad bruta (\$)                         | (62.470,53)        | 1.734,22            | 9.885,21             | 9.991,88             | 10.679,21            | 9.991,88             | 11.325,21            |
| Impuestos (\$)                              |                    | (520,27)            | (2.965,56)           | (2.997,56)           | (3.203,76)           | (2.997,56)           | (3.397,56)           |
| Utilidad neta (\$)                          | (62.470,53)        | 1.213,95            | 6.919,65             | 6.994,31             | 7.475,45             | 6.994,31             | 7.927,65             |
| <b>Flujo de caja (\$)</b>                   | <b>(62.470,53)</b> | <b>2.268,75</b>     | <b>7.974,44</b>      | <b>8.049,11</b>      | <b>8.530,24</b>      | <b>8.049,11</b>      | <b>8.982,44</b>      |
| Flujo de caja inflado (\$)                  | (62.470,53)        | 2.314,12            | 8.296,61             | 8.541,78             | 9.233,40             | 8.886,87             | 10.115,68            |
| <b>Flujo de caja inflado acumulado (\$)</b> | <b>(62.470,53)</b> | <b>(60.156,40)</b>  | <b>(51.859,80)</b>   | <b>(43.318,02)</b>   | <b>(34.084,62)</b>   | <b>(25.197,75)</b>   | <b>(15.082,07)</b>   |
| Utilidad en Bs (1500 Bs = \$)               |                    | <b>1.820.931,53</b> | <b>10.379.468,93</b> | <b>10.491.472,43</b> | <b>11.213.168,93</b> | <b>10.491.472,43</b> | <b>11.891.468,93</b> |

Tabla N°AVI: Flujo de caja del Modelo Físico con 131 cerdos (continuación)

| Año                                  | 7<br>2009            | 8<br>2010           | 9<br>2011            | 10<br>2012           | 11<br>2013           | 12<br>2014          | 13<br>2015           |
|--------------------------------------|----------------------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------|----------------------|
| <b>Insumos</b>                       |                      |                     |                      |                      |                      |                     |                      |
| Cal (\$)                             | (1,73)               | (1,73)              | (1,73)               | (1,73)               | (1,73)               | (1,73)              | (1,73)               |
| Agua (\$)                            | (120,00)             | (120,00)            | (120,00)             | (120,00)             | (120,00)             | (120,00)            | (120,00)             |
| Alimentación (\$)                    | (22.095,31)          | (22.095,31)         | (22.095,31)          | (22.095,31)          | (22.095,31)          | (22.095,31)         | (22.095,31)          |
| <b>Sub total insumo (\$)</b>         | <b>(22.217,05)</b>   | <b>(22.217,05)</b>  | <b>(22.217,05)</b>   | <b>(22.217,05)</b>   | <b>(22.217,05)</b>   | <b>(22.217,05)</b>  | <b>(22.217,05)</b>   |
| <b>Costo de mantenimiento</b>        |                      |                     |                      |                      |                      |                     |                      |
| Veterinario (\$)                     | (266,67)             | (266,67)            | (266,67)             | (266,67)             | (266,67)             | (266,67)            | (266,67)             |
| Personal (\$)                        | (1.280,00)           | (1.280,00)          | (1.280,00)           | (1.280,00)           | (1.280,00)           | (1.280,00)          | (1.280,00)           |
| Nuevos Cochinos (\$)                 | (256,00)             | 0,00                | (1.440,00)           | (256,00)             | (1.440,00)           | (1.440,00)          | (256,00)             |
| <b>Sub total mantenimiento</b>       | <b>(1.802,67)</b>    | <b>(1.546,67)</b>   | <b>(2.986,67)</b>    | <b>(1.802,67)</b>    | <b>(2.986,67)</b>    | <b>(2.986,67)</b>   | <b>(1.802,67)</b>    |
| Valor residual (\$)                  |                      |                     |                      |                      |                      |                     |                      |
| <b>Inversión Fija</b>                |                      |                     |                      |                      |                      |                     |                      |
| Construcción cochinería (\$)         |                      |                     |                      |                      |                      |                     |                      |
| Lagunas (\$)                         |                      |                     |                      |                      |                      |                     |                      |
| Campanas (\$)                        |                      |                     |                      |                      |                      |                     |                      |
| Trapiche (\$)                        |                      |                     |                      |                      |                      |                     |                      |
| Biodigestor (\$)                     |                      | (570,00)            |                      |                      |                      | (570,00)            |                      |
| Tubería agua (\$)                    |                      |                     |                      |                      |                      |                     |                      |
| Tubería gas (\$)                     |                      |                     |                      |                      |                      |                     |                      |
| <b>Sub-total inversión (\$)</b>      |                      |                     |                      |                      |                      |                     |                      |
| <b>Total egresos (\$)</b>            | <b>(24.019,71)</b>   | <b>(24.333,71)</b>  | <b>(25.203,71)</b>   | <b>(24.019,71)</b>   | <b>(25.203,71)</b>   | <b>(25.773,71)</b>  | <b>(24.019,71)</b>   |
| Depreciación (\$)                    | 1.054,79             | 1.054,79            | 1.054,79             | 1.054,79             | 1.054,79             | 1.054,79            | 1.054,79             |
| Venta (\$)                           | 34.214,13            | 32.700,80           | 34.034,13            | 32.880,80            | 34.034,13            | 34.034,13           | 32.880,80            |
| Utilidad bruta (\$)                  | 11.249,21            | 9.421,88            | 9.885,21             | 9.915,88             | 9.885,21             | 9.315,21            | 9.915,88             |
| Impuestos (\$)                       | (3.374,76)           | (2.826,56)          | (2.965,56)           | (2.974,76)           | (2.965,56)           | (2.794,56)          | (2.974,76)           |
| Utilidad neta (\$)                   | 7.874,45             | 6.595,31            | 6.919,65             | 6.941,11             | 6.919,65             | 6.520,65            | 6.941,11             |
| Flujo de caja (\$)                   | 8.929,24             | 7.650,11            | 7.974,44             | 7.995,91             | 7.974,44             | 7.575,44            | 7.995,91             |
| Flujo de caja inflado (\$)           | 10.256,89            | 8.963,32            | 9.530,19             | 9.746,97             | 9.915,21             | 9.607,49            | 10.343,56            |
| Flujo de caja inflado acumulado (\$) | (4.825,18)           | 4.138,14            | 13.668,33            | 23.415,30            | 33.330,51            | 42.938,00           | 53.281,56            |
| <b>Utilidad en Bs (1500 Bs = \$)</b> | <b>11.811.668,93</b> | <b>9.892.972,43</b> | <b>10.379.468,93</b> | <b>10.411.672,43</b> | <b>10.379.468,93</b> | <b>9.780.968,93</b> | <b>10.411.672,43</b> |

Tabla N°AVI: Flujo de caja del Modelo Físico con 131 cerdos (continuación)

| Año                                  | 14<br>2016           | 15<br>2017           | 16<br>2018          | 17<br>2019           | 18<br>2020           | 19<br>2021           | 20<br>2022          |
|--------------------------------------|----------------------|----------------------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| <b>Insumos</b>                       |                      |                      |                     |                      |                      |                      |                     |
| Cal (\$)                             | (1,73)               | (1,73)               | (1,73)              | (1,73)               | (1,73)               | (1,73)               | (1,73)              |
| Agua (\$)                            | (120,00)             | (120,00)             | (120,00)            | (120,00)             | (120,00)             | (120,00)             | (120,00)            |
| Alimentación (\$)                    | (22.095,31)          | (22.095,31)          | (22.095,31)         | (22.095,31)          | (22.095,31)          | (22.095,31)          | (22.095,31)         |
| <b>Sub total insumo (\$)</b>         | <b>(22.217,05)</b>   | <b>(22.217,05)</b>   | <b>(22.217,05)</b>  | <b>(22.217,05)</b>   | <b>(22.217,05)</b>   | <b>(22.217,05)</b>   | <b>(22.217,05)</b>  |
| <b>Costo de mantenimiento</b>        |                      |                      |                     |                      |                      |                      |                     |
| Veterinario (\$)                     | (266,67)             | (266,67)             | (266,67)            | (266,67)             | (266,67)             | (266,67)             | (266,67)            |
| Personal (\$)                        | (1.280,00)           | (1.280,00)           | (1.280,00)          | (1.280,00)           | (1.280,00)           | (1.280,00)           | (1.280,00)          |
| Nuevos Cochinos (\$)                 | 0,00                 | 0,00                 | (256,00)            | (1.440,00)           | 0,00                 | (256,00)             | 0,00                |
| <b>Sub total mantenimiento</b>       | <b>(1.546,67)</b>    | <b>(1.546,67)</b>    | <b>(1.802,67)</b>   | <b>(2.986,67)</b>    | <b>(1.546,67)</b>    | <b>(1.802,67)</b>    | <b>(1.546,67)</b>   |
| Valor residual (\$)                  |                      |                      |                     |                      |                      |                      | 12500               |
| <b>Inversión Fija</b>                |                      |                      |                     |                      |                      |                      |                     |
| Construcción cochinería (\$)         |                      |                      |                     |                      |                      |                      |                     |
| Lagunas (\$)                         |                      |                      |                     |                      |                      |                      |                     |
| Campanas (\$)                        |                      |                      |                     |                      |                      |                      |                     |
| Trapiche (\$)                        |                      |                      |                     |                      |                      |                      |                     |
| Biodigestor (\$)                     |                      |                      | (570,00)            |                      |                      |                      | (570,00)            |
| Tubería agua (\$)                    |                      |                      |                     |                      |                      |                      |                     |
| Tubería gas (\$)                     |                      |                      |                     |                      |                      |                      |                     |
| <b>Sub-total inversión (\$)</b>      |                      |                      |                     |                      |                      |                      |                     |
| <b>Total egresos (\$)</b>            | <b>(23.763,71)</b>   | <b>(23.763,71)</b>   | <b>(24.589,71)</b>  | <b>(25.203,71)</b>   | <b>(23.763,71)</b>   | <b>(24.019,71)</b>   | <b>(24.333,71)</b>  |
| Depreciación (\$)                    | 1.054,79             | 1.054,79             | 1.054,79            | 1.054,79             | 1.054,79             | 1.054,79             | 1.054,79            |
| Venta (\$)                           | 34.030,80            | 32.700,80            | 32.880,80           | 34.034,13            | 32.700,80            | 34.214,13            | 32.700,80           |
| Utilidad bruta (\$)                  | 11.321,88            | 9.991,88             | 9.345,88            | 9.885,21             | 9.991,88             | 11.249,21            | 9.421,88            |
| Impuestos (\$)                       | (3.396,56)           | (2.997,56)           | (2.803,76)          | (2.965,56)           | (2.997,56)           | (3.374,76)           | (2.826,56)          |
| Utilidad neta (\$)                   | 7.925,31             | 6.994,31             | 6.542,11            | 6.919,65             | 6.994,31             | 7.874,45             | 6.595,31            |
| Flujo de caja (\$)                   | 8.980,11             | 8.049,11             | 7.596,91            | 7.974,44             | 8.049,11             | 8.929,24             | 20.150,11           |
| Flujo de caja inflado (\$)           | 11.849,06            | 10.833,04            | 10.428,93           | 11.166,14            | 11.496,11            | 13.008,21            | 29.942,00           |
| Flujo de caja inflado acumulado (\$) | 65.130,62            | 75.963,66            | 86.392,58           | 97.558,72            | 109.054,83           | 122.063,05           | 152.005,04          |
| <b>Utilidad en Bs (1500 Bs = \$)</b> | <b>11.887.972,43</b> | <b>10.491.472,43</b> | <b>9.813.172,43</b> | <b>10.379.468,93</b> | <b>10.491.472,43</b> | <b>11.811.668,93</b> | <b>9.892.972,43</b> |

Tabla N°AVII: Flujo de caja del Modelo Físico con 107 cerdos

| Año                                  | 0<br>2002          | 1<br>2003           | 2<br>2004           | 3<br>2005           | 4<br>2006           | 5<br>2007           | 6<br>2008           |
|--------------------------------------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| <b>Insumos</b>                       |                    |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| Cal (\$)                             |                    | (1,73)              | (1,73)              | (1,73)              | (1,73)              | (1,73)              | (1,73)              |
| Agua (\$)                            |                    | (115,00)            | (115,00)            | (115,00)            | (115,00)            | (115,00)            | (115,00)            |
| Alimentación (\$)                    |                    | (9.356,39)          | (14.081,09)         | (15.212,22)         | (14.081,09)         | (14.081,09)         | (15.212,22)         |
| <b>Sub total insumo (\$)</b>         |                    | <b>(9.473,13)</b>   | <b>(14.197,83)</b>  | <b>(15.328,96)</b>  | <b>(14.197,83)</b>  | <b>(14.197,83)</b>  | <b>(15.328,96)</b>  |
| <b>Costo de mantenimiento</b>        |                    |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| Veterinario (\$)                     |                    | (266,67)            | (266,67)            | (266,67)            | (266,67)            | (266,67)            | (266,67)            |
| Personal (\$)                        |                    | (1.280,00)          | (1.280,00)          | (1.280,00)          | (1.280,00)          | (1.280,00)          | (1.280,00)          |
| Nuevos Cochinos (\$)                 |                    | (1.696,00)          | (1.440,00)          | 0,00                | (256,00)            | 0,00                | 0,00                |
| <b>Sub total mantenimiento</b>       |                    | <b>(3.242,67)</b>   | <b>(2.986,67)</b>   | <b>(1.546,67)</b>   | <b>(1.802,67)</b>   | <b>(1.546,67)</b>   | <b>(1.546,67)</b>   |
| Valor residual (\$)                  |                    |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| <b>Inversión Fija</b>                |                    |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| Construcción cochinería (\$)         | (41.374,67)        |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| Lagunas (\$)                         | (2.599,84)         |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| Campanas (\$)                        | (266,67)           |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| Trapiche (\$)                        | (9.868,34)         |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| Biodigestor (\$)                     | (8.241,37)         |                     |                     |                     | (4.120,69)          |                     |                     |
| Tubería agua (\$)                    | (57,86)            |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| Tubería gas (\$)                     | (61,78)            |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| <b>Sub-total inversión (\$)</b>      | <b>(62.470,53)</b> |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| <b>Total egresos (\$)</b>            | <b>(62.470,53)</b> | <b>(12.715,79)</b>  | <b>(17.184,49)</b>  | <b>(16.875,62)</b>  | <b>(20.121,18)</b>  | <b>(15.744,49)</b>  | <b>(16.875,62)</b>  |
| Depreciación (\$)                    |                    | 1.054,79            | 1.054,79            | 1.054,79            | 1.054,79            | 1.054,79            | 1.054,79            |
| Venta (\$)                           | 0,00               | 13.500,80           | 24.050,13           | 22.716,80           | 24.230,13           | 22.716,80           | 24.050,13           |
| Utilidad bruta (\$)                  | (62.470,53)        | 1.839,80            | 7.920,43            | 6.895,97            | 5.163,74            | 8.027,10            | 8.229,30            |
| Impuestos (\$)                       |                    | (551,94)            | (2.376,13)          | (2.068,79)          | (1.549,12)          | (2.408,13)          | (2.46,79)           |
| Utilidad neta (\$)                   | (62.470,53)        | 1.287,86            | 5.544,30            | 4.827,18            | 3.614,62            | 5.618,97            | 5.760,51            |
| Flujo de caja (\$)                   | (62.470,53)        | 2.342,65            | 6.599,09            | 5.881,97            | 4.669,41            | 6.673,76            | 6.815,30            |
| Flujo de caja inflado (\$)           | (62.470,53)        | 2.389,51            | 6.865,70            | 6.242,00            | 5.054,32            | 7.368,37            | 7.675,14            |
| Flujo de caja inflado acumulado (\$) | (62.470,53)        | (60.081,02)         | (53.215,32)         | (46.973,33)         | (41.919,00)         | (34.550,63)         | (26.875,49)         |
| <b>Utilidad en Bs (1500 Bs = \$)</b> |                    | <b>1.931.790,53</b> | <b>8.316.452,03</b> | <b>7.240.769,03</b> | <b>5.421.931,85</b> | <b>8.428.455,53</b> | <b>8.640.765,53</b> |

Tabla N°AVI: Flujo de caja del Modelo Físico con 107 cerdos (continuación)

| Año                                  | 7<br>2009           | 8<br>2010           | 9<br>2011           | 10<br>2012          | 11<br>2013          | 12<br>2014          | 13<br>2015          |
|--------------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| <b>Insumos</b>                       |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| Cal (\$)                             | (1,73)              | (1,73)              | (1,73)              | (1,73)              | (1,73)              | (1,73)              | (1,73)              |
| Agua (\$)                            | (115,00)            | (115,00)            | (115,00)            | (115,00)            | (115,00)            | (115,00)            | (115,00)            |
| Alimentación (\$)                    | (14.081,09)         | (14.081,09)         | (14.081,09)         | (14.081,09)         | (14.081,09)         | (14.081,09)         | (15.212,22)         |
| <b>Sub total insumo (\$)</b>         | <b>(14.197,83)</b>  | <b>(14.197,83)</b>  | <b>(14.197,83)</b>  | <b>(14.197,83)</b>  | <b>(14.197,83)</b>  | <b>(14.197,83)</b>  | <b>(15.328,96)</b>  |
| <b>Costo de mantenimiento</b>        |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| Veterinario (\$)                     | (266,67)            | (266,67)            | (266,67)            | (266,67)            | (266,67)            | (266,67)            | (266,67)            |
| Personal (\$)                        | (1.280,00)          | (1.280,00)          | (1.280,00)          | (1.280,00)          | (1.280,00)          | (1.280,00)          | (1.280,00)          |
| Nuevos Cochinos (\$)                 | (256,00)            | 0,00                | (1.440,00)          | (256,00)            | (1.440,00)          | (1.440,00)          | (256,00)            |
| <b>Sub total mantenimiento</b>       | <b>(1.802,67)</b>   | <b>(1.546,67)</b>   | <b>(2.986,67)</b>   | <b>(1.802,67)</b>   | <b>(2.986,67)</b>   | <b>(2.986,67)</b>   | <b>(1.802,67)</b>   |
| Valor residual (\$)                  |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| <b>Inversión Fija</b>                |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| Construcción cochinería (\$)         |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| Lagunas (\$)                         |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| Campanas (\$)                        |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| Trapiche (\$)                        |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| Biodigestor (\$)                     |                     | (4.120,69)          |                     |                     |                     | (4.120,69)          |                     |
| Tubería agua (\$)                    |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| Tubería gas (\$)                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| <b>Sub-total inversión (\$)</b>      |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| <b>Total egresos (\$)</b>            | <b>(16.000,49)</b>  | <b>(19.865,18)</b>  | <b>(17.184,49)</b>  | <b>(16.000,49)</b>  | <b>(17.184,49)</b>  | <b>(21.305,18)</b>  | <b>(17.131,62)</b>  |
| Depreciación (\$)                    | 1.054,79            | 1.054,79            | 1.054,79            | 1.054,79            | 1.054,79            | 1.054,79            | 1.054,79            |
| Venta (\$)                           | 24.230,13           | 22.716,80           | 24.050,13           | 22.896,80           | 24.050,13           | 24.050,13           | 22.896,80           |
| Utilidad bruta (\$)                  | 9.284,43            | 3.906,41            | 7.920,43            | 7.951,10            | 7.920,43            | 3.799,74            | 6.819,97            |
| Impuestos (\$)                       | (2.785,33)          | (1.171,92)          | (2.376,13)          | (2.385,33)          | (2.376,13)          | (1.139,92)          | (2.045,99)          |
| Utilidad neta (\$)                   | 6.499,10            | 2.734,49            | 5.544,30            | 5.565,77            | 5.544,30            | 2.659,82            | 4.773,98            |
|                                      | 7.553,89            | 3.789,28            | 6.599,09            | 6.620,56            | 6.599,09            | 3.714,61            | 5.828,77            |
| Flujo de caja inflado (\$)           | 8.677,05            | 4.439,75            | 7.886,53            | 8.070,43            | 8.205,14            | 4.711,03            | 7.540,14            |
| Flujo de caja inflado acumulado (\$) | (18.198,44)         | (13.758,69)         | (5.872,17)          | 2.198,26            | 10.403,41           | 15.114,44           |                     |
| <b>Utilidad en Bs (1500 Bs = \$)</b> | <b>9.748.652,03</b> | <b>4.101.735,35</b> | <b>8.316.452,03</b> | <b>8.348.655,53</b> | <b>8.316.452,03</b> | <b>3.989.731,85</b> | <b>7.160.969,03</b> |

Tabla N°AVII: Flujo de caja del Modelo Físico con 107 cerdos (continuación)

| Año                                  | 14<br>2016          | 15<br>2017          | 16<br>2018          | 17<br>2019          | 18<br>2020          | 19<br>2021          | 20<br>2022          |
|--------------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| <b>Insumos</b>                       |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| Cal (\$)                             | (1,73)              | (1,73)              | (1,73)              | (1,73)              | (1,73)              | (1,73)              | (1,73)              |
| Agua (\$)                            | (115,00)            | (115,00)            | (115,00)            | (115,00)            | (115,00)            | (115,00)            | (115,00)            |
| Alimentación (\$)                    | (14.081,09)         | (15.212,22)         | (14.081,09)         | (14.081,09)         | (15.212,22)         | (14.081,09)         | (14.081,09)         |
| <b>Sub total insumo (\$)</b>         | <b>(14.197,83)</b>  | <b>(15.328,96)</b>  | <b>(14.197,83)</b>  | <b>(14.197,83)</b>  | <b>(15.328,96)</b>  | <b>(14.197,83)</b>  | <b>(14.197,83)</b>  |
| <b>Costo de mantenimiento</b>        |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| Veterinario (\$)                     | (266,67)            | (266,67)            | (266,67)            | (266,67)            | (266,67)            | (266,67)            | (266,67)            |
| Personal (\$)                        | (1.280,00)          | (1.280,00)          | (1.280,00)          | (1.280,00)          | (1.280,00)          | (1.280,00)          | (1.280,00)          |
| Nuevos Cochinos (\$)                 | 0,00                | 0,00                | (256,00)            | (1.440,00)          | 0,00                | (256,00)            | 0,00                |
| <b>Sub total mantenimiento</b>       | <b>(1.546,67)</b>   | <b>(1.546,67)</b>   | <b>(1.802,67)</b>   | <b>(2.986,67)</b>   | <b>(1.546,67)</b>   | <b>(1.802,67)</b>   | <b>(1.546,67)</b>   |
| Valor residual (\$)                  |                     |                     |                     |                     |                     |                     | 12500               |
| <b>Inversión Fija</b>                |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| Construcción cochinería (\$)         |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| Lagunas (\$)                         |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| Campanas (\$)                        |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| Trapiche (\$)                        |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| Biodigestor (\$)                     |                     |                     | (4.120,69)          |                     |                     |                     | (4.120,69)          |
| Tubería agua (\$)                    |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| Tubería gas (\$)                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| <b>Sub-total inversión (\$)</b>      |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| <b>Total egresos (\$)</b>            | <b>(15.744,49)</b>  | <b>(16.875,62)</b>  | <b>(20.121,18)</b>  | <b>(17.184,49)</b>  | <b>(16.875,62)</b>  | <b>(16.000,49)</b>  | <b>(19.865,18)</b>  |
| Depreciación (\$)                    | 1.054,79            | 1.054,79            | 1.054,79            | 1.054,79            | 1.054,79            | 1.054,79            | 1.054,79            |
| Venta (\$)                           | 24.046,80           | 22.716,80           | 22.896,80           | 24.050,13           | 22.716,80           | 24.230,13           | 22.716,80           |
| Utilidad bruta (\$)                  | 9.357,10            | 6.895,97            | 3.830,41            | 7.920,43            | 6.895,97            | 9.284,43            | 3.906,41            |
| Impuestos (\$)                       | (2.807,13)          | (2.068,79)          | (1.149,12)          | (2.376,13)          | (2.068,79)          | (2.785,33)          | (1.171,92)          |
| Utilidad neta (\$)                   | 6.549,97            | 4.827,18            | 2.681,29            | 5.544,30            | 4.827,18            | 6.499,10            | 2.734,49            |
| Flujo de caja (\$)                   | 7.604,76            | 5.881,97            | 3.736,08            | 6.599,09            | 5.881,97            | 7.553,89            | 16.289,28           |
| Flujo de caja inflado (\$)           | 10.034,32           | 7.916,36            | 5.128,84            | 9.240,32            | 8.400,90            | 11.004,60           | 24.205,02           |
| Flujo de caja inflado acumulado (\$) | 32.688,90           | 40.605,26           | 45.734,10           | 54.974,42           | 63.375,33           | 74.379,92           | 98.584,94           |
| <b>Utilidad en Bs (1500 Bs = \$)</b> | <b>9.824.955,53</b> | <b>7.240.769,03</b> | <b>4.021.935,35</b> | <b>8.316.452,03</b> | <b>7.240.769,03</b> | <b>9.748.652,03</b> | <b>4.101.735,35</b> |

Tabla N°AVIII: Flujo de caja de granja convencional con 131 cerdos

| Año                                    | 0                  | 1                     | 2                   | 3                   | 4                   | 5                   | 6                   |
|--|--------------------|-----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Año                                    | 2002               | 2003                  | 2004                | 2005                | 2006                | 2007                | 2008                |
| <b>Insumos</b>                         |                    |                       |                     |                     |                     |                     |                     |
| Cal (\$)                               |                    | (1,73)                | (1,73)              | (1,73)              | (1,73)              | (1,73)              | (1,73)              |
| Agua (\$)                              |                    | (120,00)              | (120,00)            | (120,00)            | (120,00)            | (120,00)            | (120,00)            |
| Alimentación (\$)                      |                    | (13.336,66)           | (25.361,08)         | (25.361,08)         | (25.361,08)         | (25.361,08)         | (25.361,08)         |
| <b>Sub total insumo (\$)</b>           |                    | <b>(13,458,39)</b>    | <b>(25,482,81)</b>  | <b>(25,482,81)</b>  | <b>(25,482,81)</b>  | <b>(25,482,81)</b>  | <b>(25,482,81)</b>  |
| <b>Costo de mantenimiento</b>          |                    |                       | 0,92                |                     |                     |                     |                     |
| Veterinario (\$)                       |                    | (266,67)              | (266,67)            | (266,67)            | (266,67)            | (266,67)            | (266,67)            |
| Personal (\$)                          |                    | (1.280,00)            | (1.280,00)          | (1.280,00)          | (1.280,00)          | (1.280,00)          | (1.280,00)          |
| Nuevos Cochinos (\$)                   |                    | (1.696,00)            | (1.440,00)          | 0,00                | (256,00)            | 0,00                | 0,00                |
| <b>Sub total mantenimiento</b>         |                    | <b>(3.242,67)</b>     | <b>(2.986,67)</b>   | <b>(1.546,67)</b>   | <b>(1.802,67)</b>   | <b>(1.546,67)</b>   | <b>(1.546,67)</b>   |
| Valor residual (\$)                    |                    |                       |                     |                     |                     |                     |                     |
| <b>Inversión Fija</b>                  |                    |                       |                     |                     |                     |                     |                     |
| Construcción cochinerera (\$)          | (41.374,67)        |                       |                     |                     |                     |                     |                     |
| Lagunas (\$)                           | (974,94)           |                       |                     |                     |                     |                     |                     |
| Tubería agua (\$)                      | (21,70)            |                       |                     |                     |                     |                     |                     |
| <b>Sub-total inversión (\$)</b>        | <b>(42.371,31)</b> |                       |                     |                     |                     |                     |                     |
| <b>Total egresos (\$)</b>              | <b>(43.367,95)</b> | <b>(16.701,06)</b>    | <b>(28.469,48)</b>  | <b>(27.029,48)</b>  | <b>(27.285,48)</b>  | <b>(27.029,48)</b>  | <b>(27.029,48)</b>  |
| <b>Depreciación (\$)</b>               |                    |                       |                     |                     |                     |                     |                     |
| <b>Utilidad</b>                        |                    |                       |                     |                     |                     |                     |                     |
| Venta (\$)                             | 0,00               | 15.420,80             | 34.034,13           | 32.700,80           | 34.214,13           | 32.700,80           | 34.034,13           |
| Utilidad bruta (\$)                    | (43.367,95)        | (1.280,26)            | 5.564,65            | 5.671,32            | 6.928,65            | 5.671,32            | 7.004,65            |
| Impuestos (\$)                         |                    |                       | (1.669,40)          | (1.701,40)          | (2.078,60)          | (1.701,40)          | (2.101,40)          |
| Utilidad neta (\$)                     | (43.367,95)        | (1.280,26)            | 3.895,26            | 3.969,92            | 4.850,06            | 3.969,92            | 4.903,26            |
| Flujo de caja (\$)                     | (43.367,95)        | (1.280,26)            | 3.895,26            | 3.969,92            | 4.850,06            | 3.969,92            | 4.903,26            |
| Flujo de caja inflado (\$)             | (43.367,95)        | (1.305,86)            | 4.052,62            | 4.212,92            | 5.249,86            | 4.383,12            | 5.521,86            |
| Flujo de caja inflado acumulado (\$)   | (43.367,95)        | (44.673,81)           | (40.621,19)         | (36.408,27)         | (31.158,41)         | (26.775,30)         | (21.253,43)         |
| <b>Utilidad en Bs (1500 Bs = 1 \$)</b> |                    | <b>(1.920.384,00)</b> | <b>5.842.883,55</b> | <b>5.954.887,05</b> | <b>7.275.083,55</b> | <b>5.954.887,05</b> | <b>7.354.883,55</b> |

Tabla N°AVIII: Flujo de caja de una granja convencional con 131 cerdos (continuación)

| Año                                  | 7                   | 8                   | 9                   | 10                  | 11                  | 12                  | 13                  |
|--------------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Año                                  | 2009                | 2010                | 2011                | 2012                | 2013                | 2014                | 2015                |
| <b>Insumos</b>                       |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| Cal (\$)                             | (1,73)              | (1,73)              | (1,73)              | (1,73)              | (1,73)              | (1,73)              | (1,73)              |
| Agua (\$)                            | (120,00)            | (120,00)            | (120,00)            | (120,00)            | (120,00)            | (120,00)            | (120,00)            |
| Alimentación (\$)                    | (25.361,08)         | (25.361,08)         | (25.361,08)         | (25.361,08)         | (25.361,08)         | (25.361,08)         | (25.361,08)         |
| <b>Sub total insumo (\$)</b>         | <b>(25,482,81)</b>  |
| <b>Costo de mantenimiento</b>        |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| Veterinario (\$)                     | (266,67)            | (266,67)            | (266,67)            | (266,67)            | (266,67)            | (266,67)            | (266,67)            |
| Personal (\$)                        | (1.280,00)          | (1.280,00)          | (1.280,00)          | (1.280,00)          | (1.280,00)          | (1.280,00)          | (1.280,00)          |
| Nuevos Cochinos (\$)                 | (256,00)            | 0,00                | (1.440,00)          | (256,00)            | (1.440,00)          | (1.440,00)          | (256,00)            |
| <b>Sub total mantenimiento</b>       | <b>(1.802,67)</b>   | <b>(1.546,67)</b>   | <b>(2.986,67)</b>   | <b>(1.802,67)</b>   | <b>(2.986,67)</b>   | <b>(2.986,67)</b>   | <b>(1.802,67)</b>   |
| Valor residual (\$)                  |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| <b>Inversión Fija</b>                |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| Construcción cochinería (\$)         |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| Lagunas (\$)                         |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| Tubería agua (\$)                    |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| <b>Sub-total inversión (\$)</b>      |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| <b>Total egresos (\$)</b>            | <b>(27.285,48)</b>  | <b>(27.029,48)</b>  | <b>(28.469,48)</b>  | <b>(27.285,48)</b>  | <b>(28.469,48)</b>  | <b>(28.469,48)</b>  | <b>(27.285,48)</b>  |
| <b>Depreciación (\$)</b>             |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| <b>Utilidad</b>                      |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| Venta (\$)                           | 34.214,13           | 32.700,80           | 34.034,13           | 32.880,80           | 34.034,13           | 34.034,13           | 32.880,80           |
| Utilidad bruta (\$)                  | 6.928,65            | 5.671,32            | 5.564,65            | 5.595,32            | 5.564,65            | 5.564,65            | 5.595,32            |
| Impuestos (\$)                       | (2.078,60)          | (1.701,40)          | (1.669,40)          | (1.678,60)          | (1.669,40)          | (1.669,40)          | (1.678,60)          |
| Utilidad neta (\$)                   | 4.850,06            | 3.969,92            | 3.895,26            | 3.916,72            | 3.895,26            | 3.895,26            | 3.916,72            |
| Flujo de caja (\$)                   | 4.850,06            | 3.969,92            | 3.895,26            | 3.916,72            | 3.895,26            | 3.895,26            | 3.916,72            |
| Flujo de caja inflado (\$)           | 5.571,19            | 4.651,40            | 4.655,19            | 4.774,47            | 4.843,26            | 4.940,13            | 5.066,70            |
| Flujo de caja inflado acumulado (\$) | (15.682,24)         | (11.030,84)         | (6.375,65)          | (1.601,19)          | 3.242,07            | 8.182,20            | 13.248,90           |
| Utilidad en Bs (1500 Bs = 1 \$)      | <b>7.275.083,55</b> | <b>5.954.887,05</b> | <b>5.842.883,55</b> | <b>5.875.087,05</b> | <b>5.842.883,55</b> | <b>5.842.883,55</b> | <b>5.875.087,05</b> |

Tabla N°A.VIII: Flujo de caja de una granja convencional con 131 cerdos (continuación)

| Año                                    | 14                  | 15                  | 16                  | 17                  | 18                  | 19                  | 20                  |
|--|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Año                                    | 2016                | 2017                | 2018                | 2019                | 2020                | 2021                | 2022                |
| <b>Insumos</b>                         |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| Cal (\$)                               | (1,73)              | (1,73)              | (1,73)              | (1,73)              | (1,73)              | (1,73)              | (1,73)              |
| Agua (\$)                              | (120,00)            | (120,00)            | (120,00)            | (120,00)            | (120,00)            | (120,00)            | (120,00)            |
| Alimentación (\$)                      | (25.361,08)         | (25.361,08)         | (25.361,08)         | (25.361,08)         | (25.361,08)         | (25.361,08)         | (25.361,08)         |
| <b>Sub total insumo (\$)</b>           | <b>(25,482,81)</b>  |
| <b>Costo de mantenimiento</b>          |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| Veterinario (\$)                       | (266,67)            | (266,67)            | (266,67)            | (266,67)            | (266,67)            | (266,67)            | (266,67)            |
| Personal (\$)                          | (1.280,00)          | (1.280,00)          | (1.280,00)          | (1.280,00)          | (1.280,00)          | (1.280,00)          | (1.280,00)          |
| Nuevos Cochinos (\$)                   | 0,00                | 0,00                | (256,00)            | (1.440,00)          | 0,00                | (256,00)            | 0,00                |
| <b>Sub total mantenimiento</b>         | <b>(1.546,67)</b>   | <b>(1.546,67)</b>   | <b>(1.802,67)</b>   | <b>(2.986,67)</b>   | <b>(1.546,67)</b>   | <b>(1.802,67)</b>   | <b>(1.546,67)</b>   |
| Valor residual (\$)                    |                     |                     |                     |                     |                     |                     | 12500               |
| <b>Inversión Fija</b>                  |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| Construcción cochineras (\$)           |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| Lagunas (\$)                           |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| Tubería agua (\$)                      |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| <b>Sub-total inversión (\$)</b>        |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| <b>Total egresos (\$)</b>              | <b>(27.029,48)</b>  | <b>(27.029,48)</b>  | <b>(27.285,48)</b>  | <b>(28.469,48)</b>  | <b>(27.029,48)</b>  | <b>(27.285,48)</b>  | <b>(27.029,48)</b>  |
| <b>Depreciación (\$)</b>               |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| <b>Utilidad</b>                        |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| Venta (\$)                             | 34.030,80           | 32.700,80           | 32.880,80           | 34.034,13           | 32.700,80           | 34.214,13           | 32.700,80           |
| Utilidad bruta (\$)                    | 7.001,32            | 5.671,32            | 5.595,32            | 5.564,65            | 5.671,32            | 6.928,65            | 5.671,32            |
| Impuestos (\$)                         | (2.100,40)          | (1.701,40)          | (1.678,60)          | (1.669,40)          | (1.701,40)          | (2.078,60)          | (1.701,40)          |
| Utilidad neta (\$)                     | 4.900,92            | 3.969,92            | 3.916,72            | 3.895,26            | 3.969,92            | 4.850,06            | 3.969,92            |
| Flujo de caja (\$)                     | 4.900,92            | 3.969,92            | 3.916,72            | 3.895,26            | 3.969,92            | 4.850,06            | 16.469,92           |
| Flujo de caja inflado (\$)             | 6.466,67            | 5.343,00            | 5.376,82            | 5.454,30            | 5.670,03            | 7.065,62            | 24.473,44           |
| Flujo de caja inflado acumulado (\$)   | 19.715,57           | 25.058,56           | 30.435,39           | 35.889,68           | 41.559,71           | 48.625,33           | 73.098,77           |
| <b>Utilidad en Bs (1500 Bs = 1 \$)</b> | <b>7.351.387,05</b> | <b>5.954.887,05</b> | <b>5.875.087,05</b> | <b>5.842.883,55</b> | <b>5.954.887,05</b> | <b>7.275.083,55</b> | <b>5.954.887,05</b> |