

Resumen

Uno de los principales problemas de la sociedad actual es la gestión de la multitud de residuos que se generan. La reducción de los mismos desde el origen resulta una vía ideal para intentar minimizarlos, pero en el caso de los residuos orgánicos prácticas como esta carecen de sentido, de manera que resulta esencial poner en funcionamiento tecnologías que ayuden a minimizar el impacto de estos en las zonas donde los excedentes dificultan notablemente su absorción en el suelo de manera natural.

La situación derivada de la generación de residuos, y en concreto de los residuos orgánicos, se agrava si nos referimos a un país en vías de desarrollo, como puede ser el caso de Perú, pero aún es más grave si nos referimos a la zona del Parque Porcino de Ventanilla, donde la generación de residuos orgánicos es muy elevada y la gestión de los mismos es nula.

Para el tratamiento de los residuos orgánicos existe la posibilidad de gestionar mediante digestión anaerobia, por la que se obtienen dos productos valorizables: biogás (combustible) y fertilizante orgánico.

Si sumamos estos dos ingredientes y añadimos el factor que supone desarrollar dicha tecnología de manera sostenible y a bajo coste, obtendremos como resultado un proyecto similar a éste, en el que se realiza un estudio de viabilidad de la tecnología de Digestión Anaerobia en el Parque Porcino de Ventanilla (Lima).





Sumario (Memoria, Vol. I)

RESUMEN	1
SUMARIO (MEMORIA, VOL. I)	3
Sumario (Anexos, Vol. II)	4
1. GLOSARIO	5
2. PREFACIO	7
2.1. Origen del proyecto	8
2.2. Motivación	9
2.3. Requisitos previos	9
3. INTRODUCCIÓN	11
3.1. Objetivos del proyecto	13
3.2. Alcance del proyecto	13
4. ESTUDIO DE ALTERNATIVAS	15
4.1. Contexto	15
4.2. Tratamientos contemplados	18
4.2.1. Ciclos de la materia	18
4.2.2. Tratamientos para residuos orgánicos	20
4.2.3. Descripción de las alternativas	23
4.3. Tecnología seleccionada	37
5 TRABAJO DE CAMPO	43
5.1 Primera experiencia	45
5.2 Segunda experiencia (agua como diluyente)	52
5.2.1 Introducción y objetivos	52
5.2.2 Metodología	55
5.2.3 Resultados	70
5.2.4 Conclusiones	77
5.3 Tercera experiencia (orín como diluyente)	78
5.3.1 Introducción y objetivos	78
5.3.2 Metodología	79
5.3.3 Resultados tercera experiencia	83
5.3.4 Conclusiones	88
6. PRESUPUESTO	89



7. IMPACTO AMBIENTAL	93
CONCLUSIONES	97
AGRADECIMIENTOS	98
BIBLIOGRAFÍA	99
Referencias bibliográficas.....	99

Sumario (Anexos, Vol. II)

RESUMEN	1
SUMARIO	3
A. LA CONTRAPARTE (CIUDAD SALUDABLE).	5
B. TRABAJO REALIZADO	9
C. CONTEXTO DE VENTANILLA	23
C.6. VENTANILLA EN IMÁGENES.....	47
D. CERTIFICADO CONTRAPARTE	50
E. DATOS SEGUNDA EXPERIENCIA	51
F. ANÁLISIS PREVIOS SEGUNDA EXPERIENCIA	53
G. ANÁLISIS DURANTE EL PROCESO (CROMATOGRAFÍA)	59
H. ANÁLISIS FINALES SEGUNDA EXPERIENCIA	65
I. DATOS TERCERA EXPERIENCIA	69
J. ANÁLISIS PREVIOS TERCERA EXPERIENCIA	71
K. ANÁLISIS DURANTE TERCERA EXPERIENCIA (CROMATOGRAFÍA)	75
L. UTILIZACIÓN FINAL DEL BIOGÁS	79
M. DATOS PRIMERA EXPERIENCIA	81
N. PARÁMETROS AMBIENTALES QUE AFECTAN A LA DIGESTIÓN ANAEROBIA	93
O. FAMILIA IPARRAGUIRRE	105



1. Glosario

Biol	Fertilizante orgánico obtenido mediante la digestión anaerobia	Biogás	Gas combustible formado por metano y CO ₂ obtenido mediante la DA
DA	Digestión anaerobia	PVD	Países en vías de desarrollo
DQO	Demanda química de oxígeno	DBO	Demanda bioquímica de oxígeno
ST	Sólidos totales	SV	Sólidos volátiles
SVT	Sólidos volátiles totales	H₂S	Ácido sulfhídrico o sulfuro de hidrógeno
CO₂	Dióxido de carbono	CH₄	Metano
AAc	Ácido acético	APr	Ácido propiónico
C/N	Relación carbono nitrógeno	Kcal	Kilocaloría
°C	Grado centígrado o Celsius	K	Grado Kelvin
atm	Atmósfera	kWh	Kilovatio hora
ppm	Parte por millón (mg/l)	TR	Tiempo de retención
TRH	Tiempo de residencia hidráulico	C.S.	Ciudad Saludable
ONG	Organización No Gubernamental	ONL	Organización No Lucrativa
FORSU	Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos	CA	Compostaje
p.e.	Por ejemplo	PVC	Poli-cloro vinilo, plástico
Tn	Tonelada	mm	Milímetro
cm	centímetro	mbar	Milibar
N	Nitrógeno	P	Fósforo
K	Potasio	RO	Residuo Orgánico
S.G.R.	Sistema Gestión Residuos	F.V.	Filtros Verdes
Bg	Biogás	M.O.	Materia Orgánica
Exp.	experiencia	ml	mililitros





2. Prefacio

Realizando la matrícula para el cuatrimestre de otoño del año 2005 me matriculaba de una asignatura llamada “Tecnologías sostenibles para la gestión integral del agua” impartida por Rosario Pastor iniciando de esta manera un “viaje” que poco o nada podía imaginar en aquellos instantes. El contenido de la asignatura y especialmente el tema del trabajo que debía realizar para la misma (gestión y aprovechamiento energético de efluentes contaminados) me fueron seduciendo progresivamente hasta el punto en el que planteé a la profesora realizar mi PFC sobre esta temática recibiendo una respuesta entusiasta por parte de la misma.

Pero el punto fundamental en este “viaje” fue el día en que Rosario Pastor me citó para charlar sobre el proyecto y entró en escena una figura totalmente desconocida por mi hasta el momento: Albina Ruiz (Directora ejecutiva de la ONL Ciudad Saludable, contraparte en el presente proyecto y cuya información se recoge en el Anexo A). Éste fue el momento en el que se me planteó un giro en aquello que tenía pensado realizar, se me ofreció participar en un proyecto concreto de aplicación de tecnología para mejorar las condiciones de vida de sectores desfavorecidos dentro de un país en vías de desarrollo como es el caso de Perú. El cambio era drástico en aquello que ya tenía asumido realizar, pero aquella persona que acababa de conocer logró contagiarme de toda la energía y buenas vibraciones que desprendía y despertar en mi un interés por la cooperación que unos meses más tarde me llevó a su país natal (Perú) para participar de lleno en un proyecto que, pese a no parecer nada fácil por los grandes inconvenientes que presentaba, era realmente gratificante en el aspecto personal.

De este contacto surgió un proyecto de cooperación de un estudiante de ingeniería industrial de la “Escola Tècnica Superior d’Enginyeria Industrial de Barcelona” de la “Universitat Politècnica de Catalunya” que se enmarcó dentro de la XIV



Convocatoria de Ayudas del Centro de Cooperación para el Desarrollo de la "Universitat Politècnica de Catalunya".

2.1. Origen del proyecto

El Parque Porcino de Ventanilla (situado a las afueras de Lima es el lugar donde la ONL Ciudad Saludable decidió llevar a cabo el proyecto) presenta un panorama prácticamente desolador por lo que al aspecto ambiental se refiere (aunque este no es el único problema de esta zona) y aquí un ingeniero ambiental debería de tener muchas cosas que aportar. La gestión de los residuos en este lugar es nula, tanto de los residuos orgánicos como de los residuos inorgánicos. Los deshechos del mercado Señor de los Milagros son recolectados y llevados al lugar para que sirvan de alimento a muchos de los cerdos que allí se crían (algunos ganaderos alimentan a sus cerdos con piensos concentrados). Estos residuos contienen absolutamente de todo, de manera que la parte inorgánica, y que evidentemente es rechazada por los animales, se va acumulando en el lugar. Los márgenes del río cercano (Chillón) son auténticos botaderos incontrolados en los que las gentes esperan que los residuos desaparezcan como por "arte de magia" contaminando así una de las fuentes de agua potable de toda la ciudad de Lima (Lima se abastece de las aguas del río Chillón y Rimac). Mención especial merecen los residuos orgánicos, de especial interés en el Parque. Las heces de los cerdos se apilan sin ningún control y son incineradas poco a poco. Son innumerables los problemas ambientales que esto origina, pero son aún más importantes los problemas para la salud y el bienestar de la población.

De esta catastrófica situación nació el interés por parte de C.S. de iniciar un proyecto que tratase de solucionar la dramática situación de los habitantes del parque mediante una correcta gestión de los residuos y fuertes campañas de sensibilización de la población. Dentro de este gran proyecto, que se espera que esté en funcionamiento durante algunos años, la organización pidió que se realizase un estudio de viabilidad de implantación de la tecnología de biogás en el contexto del parque porcino pues esta podía resultar una tecnología apropiada para la gestión de los residuos orgánicos y capaz de aportar grandes beneficios sociales. Éste es el objetivo del presente proyecto.



2.2. Motivación

Ciudad Saludable, como se comenta en el anterior punto, se plantea la actuación en la zona del parque porcino de Ventanilla debido a la gravedad que presenta la situación ambiental y social. Pese a todo la situación es estable dentro de la gravedad, pues los habitantes del parque han aprendido a vivir en estas condiciones.

Enfermedades, plagas, malos olores, pobreza... son algunas de las características que el parque porcino presenta, y todo ello con una actividad que pretende introducir un alimento como es el cerdo dentro del mercado peruano, de manera que cualquier problema de salud que adquiera el cerdo del parque porcino puede ser un problema potencial para los futuros consumidores, que se pueden encontrar en cualquier punto de Lima (principalmente).

El gran proyecto que C.S. pretende realizar en Ventanilla intenta básicamente mejorar las condiciones de vida de la población del parque. La mejora viene dada a partir de la mejora de las condiciones ambientales del entorno y mejora de las condiciones de trabajo. Se intenta fomentar una correcta gestión de los residuos del parque, centrándose fundamentalmente en la gestión de los residuos orgánicos, que son los residuos más abundantes. Una correcta gestión de estos residuos puede evitar la proliferación de plagas, enfermedades, malos olores... al igual que otras incidencias nocivas para la atmósfera derivadas de la actual gestión que se realiza que consiste en la incineración de los mismos.

Con el objetivo de encontrar la tecnología o combinación de tecnologías más apropiadas para dicho contexto y posteriormente realizar el estudio de viabilidad de su implantación al igual que la optimización de la tecnología en el parque, la organización propuso un pequeño proyecto dentro del gran proyecto que se había propuesto realizar. Todo lo que se realizó en este pequeño proyecto nombrado: **Tecnologías sostenibles para la gestión de residuos en Ventanilla (Lima). Aprovechamiento energético del Biogás** se encuentra en la presente memoria.

2.3. Requisitos previos

Meses antes del desplazamiento a Perú, donde se realizó toda la parte experimental del proyecto, se iniciaron una serie de actividades en Barcelona con la intención de dejar todo preparado para realizar el proyecto con las máximas garantías una vez en Perú. Estos trabajos previos se fundamentaron en la preparación del material necesario pero, sobre todo, en la formación personal en cualquier temática relacionada con el proyecto. La



relación con todas las actividades formativas realizadas se encuentra en el Anexo B. Otro de los puntos importantes dentro de este trabajo previo fue el estudio detallado de la zona donde se quería realizar el proyecto, con el fin de poder estimar, con datos claros, la situación concreta de la zona, la problemática, las acciones que ya se habían emprendido, el actual manejo de los residuos y cualquier otro dato de interés para la implantación de la tecnología como las fuentes de energía, la generación de residuos o el acceso de los habitantes al agua. Los puntos fundamentales del trabajo previo realizado son:

Desde Barcelona:

- Realización de un curso de formación en cooperación organizado por el CCD (Centre de Cooperació pel Desenvolupament de la Universitat Politècnica de Catalunya).
- Realización de un curso sobre reutilización de aguas impartido en el Museo Agbar i organizado por la *Universitat d'estiu Ramon Llull 2006*.
- Estudio bibliográfico de las diferentes tecnologías utilizadas para la gestión de los residuos urbanos y ganaderos.
- Visita a la empresa Tracjusa (Juneda, Lleida) para conocer la tecnología utilizada en la gestión de los purines y en el aprovechamiento energético del gas generado (Biogás).
- Visita al Centro Tecnológico GIRO (Mollet del Vallés, Barcelona) siguiendo con la búsqueda bibliográfica y con la finalidad de conocer diferentes experiencias a nivel de laboratorio sobre codigestión anaerobia de purines y otros residuos.
- Presentación del proyecto al concurso de becas organizado por el CCD (Centre de Cooperació pel Desenvolupament de la UPC) aprobando éste una beca para la realización del mismo.
- Compra, preparación y traslado del material necesario para la elaboración de la primera planta piloto.
- Establecer contacto con la ONL Ciudad Saludable.

Desde Lima:

- Solicitud y obtención del permiso requerido por la municipalidad de Ventanilla representada por su alcalde Sr. Juan José López Avala para la realización de proyectos. Para este fin se coordinó con el subgerente de promoción empresarial Ingeniero Ángel Gonzáles quien dio su consentimiento para iniciar las actividades.
- Estudio detallado del contexto del Parque Porcino de Ventanilla.



3. Introducción

Uno de los puntos importantes en el presente proyecto y que se abordó tanto desde Barcelona como una vez en Lima fue el estudio detallado de la situación de Ventanilla y del Parque Porcino, estudio que se adjunta en el Anexo C. En este estudio se intenta profundizar en todos los detalles de la zona que pueden resultar vitales para la realización del proyecto. Es fundamental indagar en las características de la zona para determinar la tecnología más apropiada, pero es igualmente importante determinar que actuaciones se han realizado para mejorar la zona, cual de ellas tiene relación con lo que se pretende realizar y si han resultado o no exitosas. Esto es fundamental pues en un proyecto de este tipo es posible que el mayor freno no sean las condiciones ambientales sino la propia población, sus creencias, el conformismo con una situación ya familiar...

Como respuesta a la necesidad de una correcta gestión de residuos que se reflejaba en el estudio contextual realizado a la zona de Ventanilla y en concreto al Parque Porcino, la organización Ciudad Saludable decidió dar inicio a un proyecto que tratase de abordar este aspecto con la finalidad de mejorar las condiciones de vida de sus habitantes. Del estudio contextual también se extrajo la determinación de aplicar la tecnología de digestión anaerobia, ya que ésta, de resultar satisfactoria su implantación, podría resultar la que más beneficios aportase a los futuros usuarios.

De acuerdo con estas deducciones se decidió realizar un estudio de alternativas inicial, que proseguiría con un estudio de viabilidad de la tecnología de digestión anaerobia en el contexto de Perú. Este trabajo daría lugar al presente proyecto de cooperación en el que se trabajó con los estudios realizados por la ingeniera industrial Laura Jarauta en la elaboración de su Proyecto Final de Carrera que lleva por nombre: “**Tecnologies Sostenibles per la Gestió de Residus**”. El proyecto fue realizado en Perú.

El gran proyecto iniciado por la organización C.S. persigue los siguientes objetivos:

- Objetivo general:

- Mejora de las condiciones de vida de la población del Parque Porcino de Ventanilla.

- Objetivos específicos:

- Disminuir el impacto causado por la disposición de la fracción orgánica de los residuos generados en el Parque Porcino.



- Determinar la tecnología más apropiada para la gestión de los residuos orgánicos.
 - Optimizar la tecnología seleccionada en el lugar donde se quiere implantar el proyecto.
 - Poner en funcionamiento un sistema de generación de energía capaz de cubrir las necesidades básicas de los usuarios.
 - Cambiar en la población el concepto generalizado que las heces son un residuo, un problema y por lo tanto algo que se debe eliminar y reorientarlos para que vean estos residuos como un recurso.
 - Formar a la población sobre la correcta gestión de sus residuos orgánicos y el aprovechamiento de estos con beneficios económicos.
 - Incorporar valores ambientales en el día a día de la población.
- Además de forma indirecta se espera:
- Disminuir los contagios de enfermedades por vía de los alimentos ingeridos.
 - Disminuir la presencia de elementos patógenos derivados de la acumulación incontrolada de desechos orgánicos. (presencia de ratas, moscas, gusanos,... que pueden traer con ellos epidemias)
 - Mejorar el estado de los acuíferos de la zona, evitando el exceso de nutrientes (eutrofización).
 - Eliminar las emisiones de gases (CO, CO₂, H₂S,...) derivados de la combustión de residuos y que son altamente perjudiciales para el medio ambiente (efecto invernadero, lluvia ácida,...).
 - Mejorar la economía de las familias logrando transformar un problema (los residuos orgánicos) en un recurso del cual puedan sacar una fuente para fertilizar sus tierras o en el caso de la tecnología de digestión anaerobia una fuente de energía.
 - Intentar transformar una zona semidesértica en una zona apta para determinados cultivos, consiguiendo que los nutrientes sean fácilmente absorbidos por el suelo.



El presente proyecto no puede compartir la totalidad de los objetivos anteriormente citados, ya que el alcance es mucho más limitado. Pese a ello este estudio es fundamental para lograr la mayoría de los objetivos propuestos a gran escala.

3.1. Objetivos del proyecto

- Realizar un estudio de viabilidad de la implantación de la tecnología de D.A. en el contexto del Parque Porcino de Ventanilla. El estudio de viabilidad se realizará *in situ* experimentalmente, de manera que los resultados obtenidos puedan resultar de utilidad de cara a una posterior toma de decisiones.
- Acercar la tecnología a los futuros usuarios, haciéndoles partícipes en todo momento de las experiencias realizadas y logrando que lo vean como algo propio. Esto acompañado de una formación y sensibilización continua sobre la tecnología facilitará la futura implantación y aceptación de la misma.

3.2. Alcance del proyecto

El presente proyecto intenta mejorar las condiciones de vida de un sector muy desfavorecido de la sociedad peruana mediante la implantación de una tecnología apropiada para la correcta gestión de los residuos y así solucionar un grave problema de la zona de estudio. Además se intenta optimizar la utilización como recurso de este problema, obteniendo unos beneficios para la población que podrían llegar a cambiar sustancialmente sus vidas.

Para lograr este fin se ha intentado avanzar en diferentes vías que comprenden:

- Establecer contactos con la ONG Ciudad Saludable, consiguiendo así contribuir de la mano de una organización local en el desarrollo sostenible del Perú.
- Visita a diferentes zonas e instituciones de Perú en las que se está trabajando con biogás.
 - Bio-Agricultura Casablanca (Pachacamac, Lima)
 - Sede del IAA (Instituto alternativa Agraria) (Yanaoca, Cusco).
 - Pontificia Universidad Católica del Perú
- Estudio detallado de la situación de la zona donde se va a realizar el proyecto.



- Inmersión total en la realidad de la zona para tener la visión más cercana posible realizando absolutamente todos los experimentos y trabajos de campo *in situ* y con la implicación y colaboración directa de los futuros usuarios de la tecnología.
- Estudio de alternativas para la mejora en la gestión de residuos.
- Trabajo de campo para optimizar la tecnología seleccionada.
- Divulgación de la tecnología en diferentes zonas de Perú.
 - Charla teórico-práctica sobre Digestión Anaerobia en la Universidad de Medio Ambiente de San Martín (Moyobamba, San Martín).
 - Transferencia de información y experiencias sobre biogás con la ONG IAA (Instituto Alternativa Agraria) en su oficina de Yanaoca (Cusco).
- Campaña de sensibilización sobre la problemática de los Residuos Sólidos Urbanos y las nuevas alternativas de gestión que se brindaban en la ciudad de Pucallpa (Ucayali).
- Realización de un proyecto integrador y multidisciplinar de carácter continuista, de manera que el estudio de viabilidad y la optimización de la tecnología pueda dar lugar a una implantación real.
- El presente estudio debe servir igualmente para la obtención de fuentes de financiación para la implantación del proyecto real.



4. Estudio de alternativas

4.1. Contexto

Como se comenta anteriormente, la primera acción que se emprendió para poder realizar un proyecto con garantías fue la realización de un estudio detallado de la zona donde se quería implantar (Ventanilla). Este estudio, que tubo una barrera en el complicado acceso a la información que existe en Perú, se encuentra al completo en el Anexo C. La información extraída del estudio es de gran interés, y se encuentra detallada en las tablas 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 y 4.5 que fueron de crucial importancia de cara a la realización del proyecto.

Tabla 4.1: Datos generales sobre Ventanilla [16]

Datos generales sobre Ventanilla	
Población actual	180.000 habitantes
Humedad	80-90 %
Lluvia	Muy escasa
Temperatura	Entre 22°C verano y 17°C en invierno
Río cercano	Chillón
Abastecimiento de agua	30 % de la población
Conexión a la red de desagüe	26% de la población
Acceso a energía eléctrica	56,30% de la población

Tabla 4.2: Caracterización de residuos [16]

Caracterización de los residuos generados	
Producción de residuos sólidos	101 toneladas/día



Producción diaria por habitante	0.488 Kg/hab-día
Materia orgánica	30% en peso
Papel y cartón	11% en peso
Plásticos	8% en peso
Metal, vidrio	5.5% en peso
Otros materiales reciclables	8% en peso
Material de rechazo	38.5% en peso
Disposición en vertederos	58 toneladas

Tabla 4.3: Datos sobre el "Parque Porcino"

Datos sobre el Parque Porcino	
Área	840 hectáreas
Número familias ganaderas	2200
Letrinas	No
Instalaciones de agua	No
Desagües	No
Abastecimiento de agua	Compra en camiones cisterna

Tabla 4.4: Alimentación de los cerdos

Alimentación cerdos	
Pienso comercial	Aprox. 10%
Residuos de restaurante	Aprox. 90%



Tabla 4.5: Producción de residuos en la granja

Producción residuos en la granja estudiada	
Número total de cerdos	93
Producción media de excretas	127.75 Kg/día

A partir de la información extraída en el estudio contextual se diseñó la línea de actuación del trabajo de campo, en el que se abordarían los siguientes puntos:

- Estudio de alternativas
- Selección de la tecnología adecuada
- Estudio de viabilidad y optimización de la tecnología

Las actividades de este trabajo de campo dieron inicio el día 10 de julio de 2006 y no tienen un día de finalización previsto, pues éste es un proyecto de cooperación continuista. El estudio que se realizó durante los dos meses de estada en Perú (del 10 de julio al 10 de septiembre) no es más que el inicio de un proyecto que, si todo va bien, se demorará algunos años y que pretende lograr mejoras importantes, primero para la familia con la que se está realizando el estudio inicial y posteriormente para todo el parque porcino, intentando extender estas mejoras al resto de la población.

Los trabajos se realizan con el objetivo de contrastar la viabilidad de la tecnología y optimizarla en las condiciones que nos marca el terreno de implantación. A su vez se quiere lograr una formación y sensibilización de la población en el manejo de los residuos que generan y como este correcto manejo puede influir positivamente en su vida (buscando siempre ejemplos lo más cercanos posibles). De esta manera se pretende que los futuros usuarios sientan la tecnología como suya, de manera que se facilite sensiblemente la futura implantación. [14]

Las actividades realizadas en el trabajo de campo se centraron básicamente en estos dos aspectos, la experimentación para buscar la mejor alternativa en la gestión de los residuos generados en el Parque Porcino de Ventanilla y la sensibilización de la población con todos los procedimientos utilizados para gestionarlos. Las diferentes



alternativas que se estudiaron con posibilidad de implantación en nuestro proyecto se detallan en el apartado 4.2.

4.2. Tratamientos contemplados

En una granja porcina se generan básicamente dos tipos de residuos:

- Aguas residuales
- Residuos orgánicos

Las alternativas se plantearán únicamente teniendo en cuenta las aguas residuales como una fuente de humedad de cara a la gestión de los residuos orgánicos generados en la granja, de manera que no será precisa una gestión específica para ellas, ya que serán un recurso importante derivado de la escasez de agua en la zona. Como introducción se habla de los ciclos de la materia, ya que esta será la primera selección que deberemos realizar de cara a la tecnología que implantaremos finalmente.

4.2.1. Ciclos de la materia

Todos los elementos cambian de forma química en la tierra a partir de las interacciones con los animales, las plantas y los microorganismos, siguiendo ciclos cerrados. Se cumple así la ley de la conservación de la masa, formulada por A.L.Lavoisier: “En cualquier reacción química la masa se conserva, es decir, la masa y la materia ni se crea ni se destruye, sólo se transforma y permanece invariable”. Estos ciclos mantienen una estrecha relación con el flujo de energía en el ecosistema, así la energía que utilizan los organismos es la que se encuentra en los enlaces químicos que unen los elementos para formar las moléculas. [1]
[2]

A parte de los ciclos de los elementos, existen ciclos más globales, como el ciclo de la materia orgánica que consta de dos sub-ciclos: el ciclo aerobio y el ciclo anaerobio.

El ciclo aerobio es llevado a cabo por microorganismos que precisan de oxígeno atmosférico o disuelto en el agua. La materia orgánica es degradada a partir de un aporte energético, dando lugar a una reacción exotérmica. Se obtienen como productos finales CO_2 y H_2O . [3]

El ciclo anaerobio se desarrolla en ausencia de oxígeno molecular y precisa menor aportación energética, pero requiere mayor tiempo de reacción. La degradación de la



materia orgánica es progresiva hasta llegar a obtener como productos finales CH_4 y CO_2 . [3]

En los sistemas aerobios, los productos finales de degradación se oxidan más y por lo tanto quedan a un nivel energético menor que los productos de la digestión anaerobia. Esto explica el hecho que se precise mucha más energía en la degradación aerobia que en la anaerobia. Como consecuencia tenemos también que la degradación anaerobia es un proceso mucho más lento. [3]

La porción del ciclo que corresponde a la descomposición es la que debemos controlar para llevar a cabo los tratamientos de la materia orgánica. El proceso biológico consiste en controlar el medio requerido para el crecimiento óptimo de los microorganismos, independientemente del residuo a tratar. [3]

Cuando queremos gestionar o tratar un residuo orgánico podremos optar por las dos vías básicas de tratamiento: aerobio o anaerobio. Siendo procesos distintos es preciso conocer un poco las características básicas de estos tratamientos de forma comparativa. Se sintetizan las principales en la tabla 4.6.

Tabla 4.6 Tratamiento aerobio vs. anaerobio

FACTOR	TRATAMIENTO AEROBIO	TRATAMIENTO ANAEROBIO
Proceso de degradación [4]	Degradación de la materia orgánica a CO_2 , H_2O , nitratos, sulfatos, fosfatos y biomasa. En presencia de oxígeno molecular.	Degradación paso a paso de la materia orgánica a CO_2 , NH_4 , metano y biomasa, eventualmente H_2S . Sin la presencia de oxígeno molecular.
Crecimiento microorganismos [4]	Crecimiento muy rápido, poco tiempo de generación, gran producción de biomasa	Crecimiento lento (metanogénicas), elevado tiempo de generación, poca producción de biomasa
Condiciones ambientales microorganismos [4]	Mucha diversidad de especies, con un amplio espectro de degradación, bajo nivel especialización, baja sensibilidad	Mayor número de grupos de organismos, con condiciones ambientales contrarias, más sensibles a cambios ambientales



Operatividad [3] [4] [5] [6]	Mayor estabilidad biológica que proceso anaerobio, lo que conlleva un menor control del proceso.	Biología más conflictiva que proceso aerobio. Necesidad de control del proceso por tratarse de un sistema estanco
Demanda energética [4]	O ₂ necesario como receptor de hidrógeno, mayor demanda energética para aireación	No precisa O ₂ como aceptador de hidrógeno, menor demanda energética (no aireación)
Ganancias energéticas [4][6]	Diferencia sensible de nivel energético entre sustrato inicial y producto final, capacidad de auto-calefacción por reacción exotérmica, productos finales sin aplicación energética	Diferencia energética entre sustrato inicial y producto final baja. Nada o muy poca capacidad de auto-calefacción, productos finales con recuperación energética (metano)
Necesidad de nutrientes (N, P) [3] [5]	Mayor	Menor
Calidad del sólido digerido [3]	Menor estabilización por un proceso menor de digestión.	Mayor estabilización debido a una mayor digestión de la materia orgánica.
Productos obtenidos [4] [7]	Fertilizante orgánico sólido o compost	Fertilizante orgánico líquido y sólido, biogás como combustible
Necesidad de calefacción [3][7]	Al tratarse de una reacción exotérmica, no precisa de calefacción y puede llevarse a cabo en rangos amplios de temperatura	Precisa de calefacción en climas con mínimas anuales inferiores a los 15°C
Problemas de olores [5]	Aun tratarse de un sistema abierto, los compuestos no generan problemas de malos olores	Problemas de malos olores debido a la producción de H ₂ S y mercaptanos

4.2.2. Tratamientos para residuos orgánicos

Un tratamiento es un proceso, o combinación de procesos unitarios, aplicados para obtener una modificación de las características de los residuos, para adecuarlos a la demanda como productos de una cierta calidad. [19]

Esta adecuación puede ser:



- para equilibrar oferta i demanda en el tiempo
- para mejorar el transporte i aplicación
- para mejorar la composición

Como conceptos previos se debe mencionar que:

- La materia y la energía no se crean ni se destruyen, se transforman. Por lo tanto los tratamientos transforman los residuos en otros productos, pero nunca los eliminan o los hacen desaparecer completamente. [19]
- Todo proceso de transformación consume energía y crea sus propios residuos (rechazo de la materia primera, o un nuevo residuo o producto). Únicamente los procesos de digestión anaerobia pueden llegar a producir más energía de la que consumen, pero esto es gracias a una transformación (eliminación en este caso) de la materia orgánica. [19]
- Un tratamiento es una combinación de procesos unitarios con la finalidad de conseguir un objetivo concreto. [18]

Sin ser exhaustivos, una lista de procesos unitarios aplicables a los RO es la siguiente:

- Separación de fases
- Homogenización de caudales
- Nitrificación
- Desnitrificación
- Stripping de amoníaco
- Absorción /sales de amonio
- Oxidación aerobia mat. orgánica
- Compostaje
- Esterilización térmica
- Reducción anaerobia de mat. orgánica/ biogás
- Precipitación química de fósforo



- Precipitación /Floculación de otros componentes
- Precipitación de sales de fósforo i amonio
- Reducción biológica de fósforo
- Secado

Existen multitud de tratamientos aplicables a los RO todos ellos resultado de la combinación de algunos de los procesos unitarios mencionados en la lista anterior. [19] El contexto de Ventanilla no da demasiada libertad de elección, pues las condiciones son ciertamente extremas:

- Agua muy escasa, se compra en camiones cisterna (resulta cara para los usuarios y es un bien escaso) de manera que los tratamientos valorados serán únicamente aquellos que permitan lograr el grado requerido de humedad mediante la mezcla de RO con los propios orines de los cerdos (previa optimización del sistema de recogida).
- El tratamiento seleccionado no debe presentar una excesiva complicación tecnológica, pues una de las metas es que la tecnología acabe siendo gestionada por los propios usuarios, gente sin ningún tipo de formación en este campo. Una tecnología excesivamente complicada dificultaría sensiblemente su implantación.
- Debe de tener un bajo coste de implantación y mantenimiento, pues la zona de implantación es notablemente pobre y cualquier tipo de gasto extra realizado por los criadores de cerdos afectaría negativamente a su día a día.

Teniendo presentes las características del lugar de implantación sólo se ha considerado valorar los procedimientos de la siguiente lista considerando que son las únicas opciones que se podrían aplicar a este contexto de manera realista y cumpliendo con las condiciones mencionadas:

- Aplicación directa al suelo
- Compostaje
- Vermicompostaje (compostaje + humus)
- Biomasa (secado + quemado en calderas)



- Deposición en vertederos controlados
- Digestión Anaerobia
- Filtros Verdes

4.2.3. Descripción de las alternativas

A continuación se presentan las principales características de los tratamientos seleccionados como alternativa para la gestión de los RO del parque porcino.

Aplicación Directa

Cuando se trata de estiércol, mucha veces este se amontona en una parte de la granja y se acumula para aplicarlo a los campos de cultivo en periodo de siembra.

Este proceso implica una pérdida significativa de nutrientes por la radiación solar y la dilución con la lluvia, por lo que disminuye el potencial fertilizante.

Así mismo se precisa muchas veces de una estrategia de tratamiento para reducir las emisiones de componentes orgánicos volátiles, para el control de los olores, la mineralización de los nutrientes, el aumento de las propiedades fertilizantes y la recuperación energética de los residuos. Estos factores se controlarán con la digestión anaerobia, pero no con la aplicación directa. [24]

Además este tipo de gestión de residuos orgánicos puede provocar fácilmente un exceso de nutrientes en el suelo en unas condiciones de difícil asimilación por éste. De manera que este exceso de nutrientes, al no ser asimilados por el suelo, llegan a acumularse en los acuíferos cercanos provocando la eutrofización de los mismos. [24]

Esta aplicación debe hacerse con las debidas medidas higiénico-sanitarias para evitar la posible infección o propagación de plagas y enfermedades.



Compostaje

Es el resultado de una actividad microbiológica compleja a partir de unas condiciones particulares, que puede considerarse biotecnología según la definición de la *Délégation Générale à la Recherche Scientifique et Technique (D.G.R.S.T.)*: “Explotación industrial del potencial de los microorganismos, de las células vegetales o animales, y de los residuos que producen”.

En este proceso una fase sólida orgánica permite una actividad biológica eminentemente aeróbica al:

- servir de soporte físico y de matriz de intercambio de gases
- facilitar los nutrientes orgánicos e inorgánicos y el agua
- aportar microorganismos endógenos
- recoger los residuos metabólicos generados y actuar como aislante térmico.

Se podría decir que compostar (transformación biológica de los residuos en condiciones controladas) es gestionar los residuos orgánicos de una manera respetuosa con el entorno, involucrando y responsabilizando a la sociedad que los produce y dando al compost el destino adecuado. [23]

El compostaje se desarrolla en dos fases (*descomposición y maduración*) que deben diferenciarse y tenerse en cuenta en el diseño de una planta por sencilla que sea, estableciendo, para cada una de ellas, las dinámicas de control adecuadas. [23]

La fase de *descomposición* depende totalmente del tipo de material a tratar y de las características del sistema a aplicar. Puede dividirse en tres etapas: una inicial mesofílica durante la cual diversas familias de microorganismos mesofílicos inician la descomposición de los compuestos fácilmente degradables, provocando un incremento de la temperatura y en la que el pH desciende debido a la formación de ácidos orgánicos. La etapa inicial termofílica en la que van apareciendo los microorganismos termofílicos y en la que van apareciendo los microorganismos termofílicos y en la que la temperatura supera los 40 °C. Si se alcanza los 60 °C los hongos se inactivan y la descomposición es llevada a cabo por actinomicetos y bacterias formadoras de esporas. Las sustancias fácilmente degradables,



como azúcares, grasas, almidón y proteínas, son rápidamente consumidos y la mayoría de patógenos humanos y vegetales son destruidos; el pH se va alcalinizando al liberar amoníaco las proteínas. La tasa de degradación decrece al ir quedando los materiales más resistentes. En la tercera etapa, la temperatura empieza a disminuir, hongos termófilos reinviden el material a compostar y la celulosa y hemicelulosa van degradándose. Estas tres etapas duran de unas pocas semanas a varios meses dependiendo del material a compostar y de las condiciones de trabajo. Esta fase es la más exigente del proceso y el no realizarla en condiciones adecuadas condiciona la continuación del proceso, la aparición de problemas de lixiviados y malos olores, además de influir en la calidad del producto final. [23]

La fase de *maduración* depende del tipo de material que se ha tratado, pero su duración y las condiciones en que se deba llevar a cabo dependerán mucho del destino final del producto y como se hayan desarrollado las etapas anteriores. Requiere de pocas semanas a varios meses; en ella se generan mucho menos calor y el pH se mantiene ligeramente alcalino. En esta fase los microorganismos mesófilos, al igual que diversos tipos de microfauna colonizan el compost medio maduro. Se genera una intensa competición por los alimentos, formación de antibióticos y aparición de antagonismos; obteniéndose al final un producto, más o menos estable según la duración de la última fase. [23]

Cuando se quiere aplicar el compostaje a un R.O. es necesario preparar las **condiciones** para que, gracias a una actividad microbiana compleja, se transforme en un producto estable, aplicable al suelo, sobre el que producirá un efecto beneficioso. Que se consiga con una tecnología sencilla o compleja dependerá de las cantidades de residuo a tratar y de la disponibilidad de espacio y tiempo.

El compostaje es un sistema productivo como cualquier otro, en el que se deben controlar los materiales de entrada, la evolución del proceso y las características del producto final. Las limitaciones de su aplicación pueden dividirse en extrínsecas y intrínsecas: en el primer grupo incluiríamos las de tipo político, social, económico y tecnológico; formarían el segundo grupo las limitaciones del propio proceso (pH, temperatura, equilibrio aire/agua, de nutrientes y de biopolímeros) y de los materiales susceptibles de ser compostados (características físicas, contenido en agua, materia orgánica, nitrógeno y contaminantes).

Los condicionantes del mismo proceso afectan a los denominados “actores principales” (microorganismos: bacterias, hongos y actinomicetos) a los que, simplemente, en el diseño



de la planta de tratamiento se les tiene que facilitar las condiciones de trabajo. (Tabla 4.6) Los condicionantes biológicos junto con los físicos (transferencia de masa y energía) son los principios básicos que gobiernan el proceso.[23]

Deben de tenerse igualmente en cuenta las características de los residuos que se deban tratar, las condiciones ambientales, los limitantes biológicos, físicos y económicos.

Tipo de residuos a mezclar	Frecuencia de volteos
Relación C/N	Temperatura
Proporción de biopolímeros	Control de humedad
Humedad inicial	Control aireación
Tamaño partícula	Condiciones ambientales
Porcentaje de compost reciclado	Recirculación de aire
Inoculación	Tiempo de descomposición
Equipo de mezcla	Sistema de maduración
Sistema de descomposición	Tiempo de maduración
Maquinaria de volteo	Cribado
	Momento del cribado

Tabla 4.6 Factores controlables del compostaje [23]

El **agua** es esencial para favorecer la migración y colonización microbiana apropiada para cada fase del proceso, así como para la difusión de los residuos metabólicos. Los contenidos aconsejables para poder alcanzar y mantener un buen equilibrio con el contenido en aire varían según los materiales a tratar y sus características físicas.

Al ser aeróbico el tipo de metabolismo dominante, el aporte de **oxígeno** tiene una gran importancia; puede ser suministrado por difusión pasiva o por la convección favorecida por las diferentes temperaturas inducidas por la actividad microbiana. Ya que esta consume



oxígeno, éste debe reponerse. Volteando el material se consigue en parte; pero, para asegurar una buena aireación, es necesario forzar la entrada de aire en la matriz o asegurar unas adecuadas características físicas de la misma. [23]

Aunque se consiga una mezcla inicial autoaireante o se disponga de un sistema de aireación forzada, el volteo no debe eliminarse ya que tiene otros efectos beneficiosos como: reducir el tamaño de las partículas, homogeneizar el material y redistribuir los microorganismos, la humedad y los nutrientes; a la vez que exponer nuevas superficies al ataque microbiano.

La aireación, a su vez, está muy relacionada con la temperatura: produce enfriamiento del material por favorecer la renovación de aire y la evaporación, incrementa la actividad de los microorganismos y por lo tanto el desprendimiento de energía, pero también puede provocar una excesiva pérdida de humedad y frenar el proceso provocando una disminución de la temperatura.

El incremento de la actividad biológica genera calor que, al considerarse los residuos una masa auto aislante, es retenido provocando un incremento de la **temperatura**. La fase termogénica ha de optimizarse para maximizar la higienización que ha de alcanzar tres objetivos: prevenir el crecimiento y diseminación de patógenos durante el compostaje, destruir los inicialmente presentes y producir un producto final no recolonizable por patógenos. [23]

La generación de calor y elevación excesiva de la temperatura provoca la autoeliminación microbiana, situación que puede ser evitada mediante la aireación, ya que otra de las funciones que posee es la de disipar energía calorífica a través del calor latente de vaporización del agua. Se necesita más volumen de aire para mantener la temperatura dentro de los niveles aconsejables que para mantener el nivel de oxígeno necesario para un proceso aeróbico.

El compostaje presenta una temperatura, pH, asimilabilidad de los nutrientes... y actividad biológica en constante cambio, pero debe conocerse muy las posibles variaciones de cada parámetro para interpretarlas correctamente. De manera general, el **pH** inicial de la mezcla no debe ser un impedimento para el proceso; pero si es verdad que un valor extremo aparte de indicar algún problema en el origen del residuo puede limitar el tipo de actividad biológica y por tanto influir en el desarrollo (velocidad, tipo de reacciones) del proceso.



Puede ser más problemático el pH extremo en la zona básica debido a que, además de afectar al tipo de microorganismos, afecta a los equilibrios ácido base que influyen en la conservación del nitrógeno.

La variación de pH a lo largo del tratamiento debe seguirse ya que informa del tipo de cambios que tienen lugar. Al inicio, aunque las condiciones sean aeróbicas, disminuye debido a la formación de ácidos grasos de cadena corta por descomposición de los hidratos de carbono; este descenso de pH se manifiesta en un espacio de tiempo muy corto, ya que, si las condiciones de aireación son correctas, estos ácidos han de ser rápidamente transformados en CO_2 y H_2O e iniciarse la elevación del pH debido al amoníaco desprendido en la descomposición de las proteínas. Si las condiciones de aireación no son las correctas, se acumularán los ácidos grasos volátiles que generarán malos olores, aunque el pH puede no verse disminuido claramente debido a la presencia a la vez de ácidos y bases (amoníaco). [23]

El **equilibrio de nutrientes y biopolímeros** en la mezcla inicial resulta igualmente importante. La relación C/N es uno de los parámetros más utilizados para valorar este equilibrio, aunque no siempre se hace de la manera más adecuada. Los materiales carbonados tienen tres funciones: constituyentes de los materiales celulares, participante activo en el metabolismo energético y, a su vez, presentan unas características importantes como estructurantes ya que muchos de los materiales que lo contienen son ricos en celulosas y ligninas. Por esta razón es mejor hablar a la vez de equilibrio C/N y de biopolímeros, y conocer el grado de resistencia a la degradación que tienen. [23]

El nitrógeno es fundamentalmente un constituyente de los materiales celulares, aunque puede ser donador de electrones en el metabolismo energético y en condiciones anaerobias puede actuar como aceptor cuando se encuentra en forma de nitrito y/o nitrato.

Las proporciones de C/N y biopolímeros influyen de una manera muy destacable en la velocidad del proceso, en la generación de malos olores y lixiviados, en la pérdida de nitrógeno y en las características del producto final.

Los materiales que se composten deben tener por si solos o mezclados unas características que favorezcan el proceso y que permitan realizarlo en las mejores condiciones (energéticas, económicas, medioambientales...) posibles. Cuando se trabaje



con mezclas, es factible variar las proporciones de distintos materiales según la disponibilidad, y dirigir el tipo de compost hacia una u otra aplicación.

Vermicompostaje (compostaje + humus)

Es un sistema que usa lombrices de tierra, que degradan la materia orgánica, convirtiéndola en un abono orgánico que se aplica ampliamente en agricultura. Se usan distintos tipos de lombrices, resultando en tiempos mayores o menores de operación.[23]

Este tratamiento con lombrices se aplicaría únicamente como complemento al proceso de compostaje, de forma que el producto resultante pasara a unos depósitos repletos de lombrices a humedad alta controlada consiguiendo una degradación superior de la materia, una mayor simplicidad de las cadenas y por lo tanto una mayor asimilabilidad de los nutrientes en el suelo destinatario.

Este proceso encarece el precio de tratamiento pero logra unas características del producto final muy superiores.

Digestión anaerobia

La digestión anaerobia es un proceso de degradación de la materia orgánica en ausencia de oxígeno. Este proceso lo llevan a cabo microorganismos anaerobios (siendo por tanto un proceso biológico) que actúan en el interior de un biodigestor. Este biodigestor o reactor no es más que una cámara hermética al aire, en la que se dispone la materia orgánica para que pueda llevarse a cabo la fermentación. La digestión anaerobia se presenta entonces como una posibilidad de tratamiento de residuos orgánicos. [18]

Los residuos que podremos digerir son variados: excretas de animales, residuos de vegetales y plantas, residuos o aguas residuales agroindustriales. Aunque la mayoría de sustratos orgánicos serán adecuados, la madera o los residuos leñosos son desaconsejables. [7]

A partir de la degradación de la materia orgánica se obtienen tres productos básicos: un fertilizante orgánico líquido, un fertilizante orgánico lodoso (del vaciado por mantenimiento de la planta) y el biogás.



Los fertilizantes ayudan al equilibrio de los elementos, como el nitrógeno, en la naturaleza así como a mejorar el rendimiento de los cultivos, de forma respetuosa con el medio ambiente. En zonas donde se aplican fertilizantes químicos importados, la disponibilidad de un fertilizante orgánico ayuda a independizarse de las importaciones siendo así más autosuficientes. Los suelos mejoran su condición, evitándose también la erosión. [7] [12]

Con el biogás, se consigue un combustible respetuoso con el medio ambiente. Este biogás se obtiene de la degradación de la materia orgánica, con lo que es considerado energía de la biomasa, y como tal una energía renovable que genera un balance cero de emisiones de gases invernadero. La disponibilidad de combustible hace también que las comunidades sean autosuficientes y se autoabastezcan para no depender nuevamente de los mercados internacionales energéticos. [12]

Las ventajas para el usuario de la tecnología del biogás son el ahorro económico por el uso de los subproductos (ahorro en combustibles, disponibilidad de energía para el desarrollo de otras actividades, ahorro en fertilizantes), menos trabajo y otros beneficios cualitativos (facilidad de cocinar y mejores condiciones higiénicas, mejor iluminación, independencia energética, mejora del trabajo de la granja, mejora de la calidad del suelo). [7] [12]

- Proceso microbiológico de la digestión anaerobia

Familiarizarse con los procesos microbiológicos de la digestión anaerobia y la producción de metano es básico para el diseño, construcción y operación de las plantas de biogás. [11]

La digestión anaerobia es el resultado de la interacción de distintos grupos de bacterias, que actúan de forma simbiótica. Se caracteriza por la existencia de tres fases diferenciadas del proceso de degradación del sustrato (término genérico para designar el alimento de los microorganismos): hidrólisis, acidogénesis y metanogénesis, interviniendo diversas poblaciones bacterianas, tal y como se muestra en la figura 4.1. [6] [11]



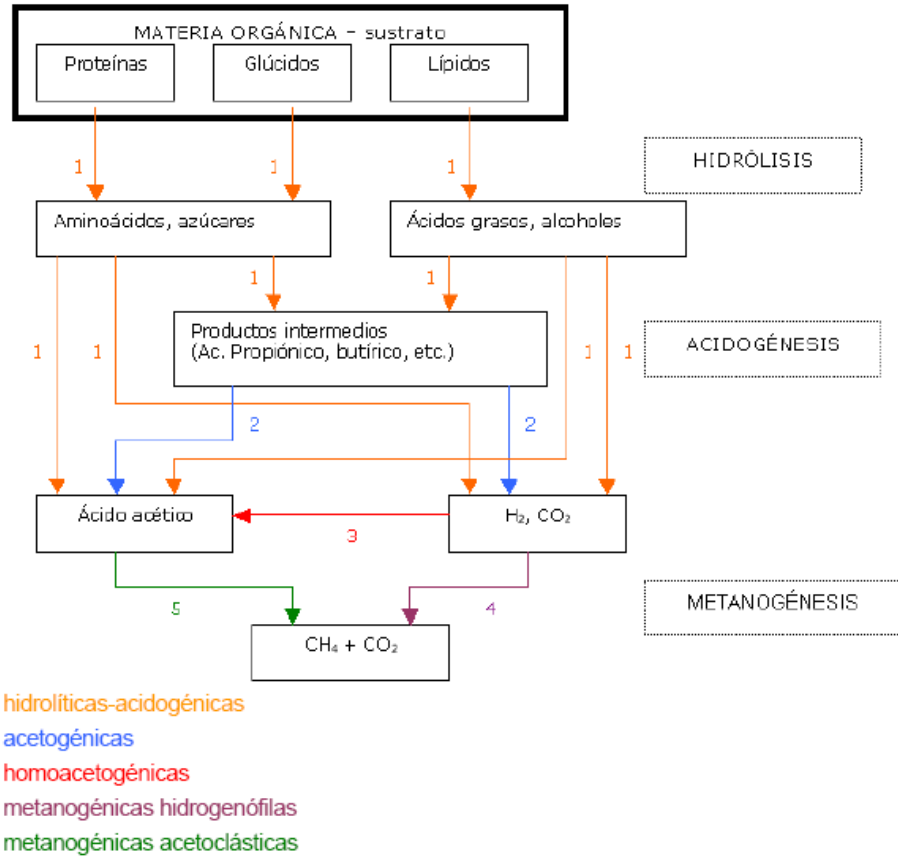


Figura 4.1 Fases de la fermentación anaerobia y p. bacterianas [6]

HIDRÓLISIS: La materia orgánica es metabolizada por las enzimas extracelulares. Se descomponen las cadenas largas de materia orgánica en otras más cortas, obteniéndose los productos intermedios. [11]

ACIDOGENESIS: En esta fase se convierten los productos intermedios en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono. [11]



Estas dos fases las llevan a cabo un primer grupo de bacterias, las hidrolíticas-acidogénicas y las acetogénicas que hidrolizan y fermentan las cadenas complejas de la materia orgánica en ácidos orgánicos simples (acético mayormente) siendo este proceso el origen del oxígeno. Son bacterias anaerobias facultativas (pueden consumir oxígeno molecular para su metabolismo, se adaptan a la presencia de oxígeno) y estrictas (no crecen en presencia de oxígeno molecular, el oxígeno resulta tóxico en mínimas cantidades). El consumo del oxígeno molecular del aire produce el ambiente anaerobio ideal para el desarrollo de las bacterias estrictas. El crecimiento bacteriano en esta etapa es rápido. En esta primera etapa no habrá reducción de la M.O. del sustrato, puesto que las cadenas orgánicas más complejas se transforman en cadenas más cortas, sin consumo o reducción de la materia orgánica presente. [3][5][8][11]

METANOGENESIS: El segundo grupo de bacterias convierte los ácidos orgánicos en metano y dióxido de carbono en esta fase. Se trata de bacterias estrictamente anaerobias, es decir que la presencia de oxígeno molecular las elimina. Se denominan bacterias metanogénicas, y las más importantes son las que transforman los ácidos propiónico y acético, denominadas bacterias metanogénicas acetoclásticas. El otro grupo de metanogénicas, las hidrogenófilas, consumen el hidrógeno generado en la primera parte de la reacción y lo convierten en biogás. Estas últimas bacterias son fundamentales para el equilibrio de las condiciones ambientales de la reacción, puesto que una acumulación de hidrógeno alteraría la biodigestión de la materia orgánica.

Las tasas de crecimiento de las bacterias metanogénicas son cinco veces menores que las de la fase anterior por ello serán las que limitarán el proceso de degradación anaerobia. Serán también las que condicionarán el tiempo de retención del reactor durante la fase de diseño, así como la temperatura de trabajo. [3][5][8]

El proceso de digestión anaerobia sucede de forma natural en los sedimentos marinos, los estómagos de los rumiantes o los pantanos, donde se dan las condiciones para que estas bacterias se desarrollen, aún siendo muy sensibles a las variaciones ambientales. [11]

El grupo de bacterias se encuentran de forma simbiótica. Las productoras de ácido o acidogénicas crean la atmósfera ideal para el desarrollo de las bacterias metanogénicas (condiciones anaerobias y cadenas orgánicas cortas). Las metanogénicas a su vez usan



los productos intermedios de las acidogénicas, que sino fueran consumidos crearían condiciones tóxicas para las acidogénicas. A la práctica son el grupo de bacterias que producen a la vez la fermentación anaerobia, sin ser posible que ninguna de ellas independientemente lleve a cabo todo el proceso. [11]

La naturaleza y composición química del sustrato, así como los factores ambientales, condicionan la composición cualitativa de la población bacteriana existente en cada etapa. Se altera asimismo la velocidad de reacción y la calidad del efluente. [3]

Como resultado de la actividad de las bacterias anaerobias se obtiene un efluente estabilizado (cuya materia orgánica está en su forma más sencilla, sin posibilidad de volver a transformarse en condiciones ambientales) y el biogás. El efluente o biol se puede aplicar como fertilizante, puesto que los nutrientes no son eliminados por las bacterias de la digestión anaerobia, consiguiendo así como producto un fertilizante orgánico de calidad variable en función del sustrato tratado. El biogás está formado, dependiendo en gran parte del sustrato, por un 40-70% de metano; 30-60% de CO_2 y pequeñas cantidades de otros gases, como ácido sulfhídrico. Tiene un poder calorífico aproximado de 5.500 kcal/m^3 . El factor de conversión de la DQO a metano será de $0,25 \text{ kg CH}_4/\text{kg DQO}$ (que equivale a $0,38 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg DQO}$ a una temperatura de 25°C y presión de una atmósfera). En energía primaria sería de $3,5 \text{ kWh/DQO}$ eliminada, hecho que representa una gran ventaja frente sistemas aerobios que requieren 1 kWh/kg O_2 consumido. [6][8]

- Parámetros ambientales

Las bacterias, como seres vivos, se ven afectadas por las condiciones ambientales del entorno. Las bacterias metanogénicas determinan los rangos adecuados para el proceso de digestión, por su lento crecimiento y su alta sensibilidad a la variación de los parámetros. En el *Anexo N* se caracterizan los parámetros ambientales que afectan a la biodigestión y los parámetros de control de la misma.



- Corrientes residuales a tratar

Cualquier tipo de sustancia orgánica con un contenido suficiente de humedad es adecuada para tratar mediante la digestión anaerobia, es decir, puede fermentar o ser digerida. Aún así, sólo deberán considerarse los sustratos homogéneos para las plantas de diseño más simple: estiércol y orina de cerdos, ganado, aves de corral y aguas residuales de sanitarios. Residuos y aguas residuales de las industrias también serán adecuados para plantas simples si son homogéneos y en estado líquido. [11]

La producción específica de gas (m^3 de gas/ masa o volumen de sustrato alimentado) dependerá del tipo de alimentación que se introduzca en el reactor y de la tecnología escogida. [11]

Distinguiremos dos tipos de sustratos en función de la humedad que tengan: aguas residuales y residuos orgánicos. Las tecnologías de los digestores serán diferentes para cada tipo de corriente, que pueden ser de orígenes muy variados: crianza de animales, restos vegetales de cosecha, domiciliarios o de industrias agroalimentarias. [7] Nos centraremos en los residuos orgánicos por su ajuste al presente proyecto.

Existen distintos tipos de residuos orgánicos que podremos tratar. La mezcla de los diferentes residuos será muy común, bien porque son generados por los usuarios y todos deben tratarse o bien porque las características del sustrato no son buenas (humedad, ratio C/N...).

En el caso de disponer residuos de origen animal y vegetal, si la cantidad de sólidos totales no excede del 10%, los reactores simples de digestión anaerobia pueden trabajar sin problemas con una mezcla de estiércol animal y restos vegetales (paja, forraje). Los restos vegetales deberán ser triturados antes de introducirlos en el reactor. [7]

En cuanto a la composición del sustrato, el ratio C/N de excrementos de animales y humanos es favorable para la fermentación anaerobia (encontrándose entre el 9:1 y el 25:1), mientras que los vegetales tienen un mayor contenido carbonoso.

En muchos casos se mezclarán distintos tipos de sustratos para optimizar la producción de gas y la estabilización del proceso de fermentación. La *Ecuación 4.1* puede usarse para calcular las características de la mezcla:



$$M_{ST} = \frac{\sum_{i=1}^n (ST_i \times W_i)}{\sum_{i=1}^n (W_i)} \qquad M_{C/N} = \frac{\sum_{i=1}^n (C / N_i \times W_i)}{\sum_{i=1}^n (W_i)}$$

Ecuación 4.1 Cálculo características mezcla [20]

Dónde:

$M_{C/N}$ – ratio C/N de la mezcla de n sustratos

M_{ST} – sólidos totales mezcla de n sustratos

C/N_i – ratio C/N del sustrato i

W_i – masa del sustrato i

ST_i – sólidos totales del sustrato i

Filtros verdes (aguas residuales)

Son sistemas de plantas que en sus raíces y usando grava como medio de fijación, acumulan bacterias que degradan de forma aerobia la materia orgánica. La corriente de agua se escurre por las raíces de las plantas y en esa parte las bacterias eliminan el contenido orgánico de las aguas. [21][22]

Los humedales construidos, como también se conocen, son una alternativa de bajo coste para el tratamiento de aguas residuales de pequeños núcleos urbanos. Los elevados rendimientos de depuración y el coste nulo de explotación convierten esta instalación en un sistema de depuración idóneo para tratar aguas residuales en pequeños núcleos urbanos. [21]

Es un sistema que si se usa como único tratamiento de las aguas puede comportar grandes dimensiones de lechos, convirtiendo así este tratamiento en no factible. La



mayoría de instalaciones son menos de 1.000 m^2 . Puede idearse como un tratamiento terciario después de un tratamiento biológico (lagunas o biodigestores), alcanzando así mejores resultados de depuración. [21][22]

Los costes de este tipo de planta son mayormente de diseño y construcción. En el diseño se proyectan los lechos de carrizos o juncos, determinándose el pendiente de drenaje, la entrada y la salida de las aguas y el tiempo de residencia aproximado que habrá. Hay que asegurar un correcto flujo hidráulico para evitar la creación de zonas muertas en los lechos. Estos lechos se impermeabilizan, como las lagunas, en su parte inferior. Los costes de explotación son únicamente el control visual de la planta y la limpieza de los filtros del pre-tratamiento si los hubiera. [21][22]

Las especies de plantas que podrán usarse son de tres tipos:

- Especies flotantes – jacintos de agua, que sino es una especie de la zona puede originar graves problemas por su carácter invasor.
- Especies sumergidas – son poco adecuadas, por su baja productividad
- Especies emergentes – junco de laguna, hierba de maná, carrizo, lirio amarillo, espadaña fina, juncos, enneas, aneas, espadañas

Las más adecuadas son estas últimas. Un sistema bien diseñado puede llegar a tener una vida útil de 35 años, y en su desmantelamiento se obtendrá material tipo turba que puede ser usado en agricultura.

El resto de posibles salidas para los RO (*Deposición en vertederos controlados, secado + quemado*) han sido desestimadas de antemano por representar alternativas poco respetuosas con el medio ambiente.

La deposición en vertederos controlados se practica actualmente en Perú, con resultados nefastos para el entorno. Por ello se está dejando de utilizar.

El secado + quemado representa una alternativa poco respetuosa con el medio y cara, pues los hornos necesarios resultan un gasto excesivo para la sociedad peruana.



4.3. Tecnología seleccionada.

Valorando todas las variables anteriormente mencionadas y las condiciones que nos ofrece el terreno de implantación de la tecnología (Anexo C) se decidieron poner en práctica experiencias para valorar la factibilidad de tres sistemas diferentes y complementarios:

- Digestión anaerobia
- Compostaje
- Filtros verdes (pequeña escala)

pues se consideró que estas son las tecnologías que pueden dar un mejor resultado en el contexto en que nos movemos, por:

- Moderada inversión inicial
- Bajo coste de mantenimiento
- Calidad del producto obtenido
- Complementariedad
- Solución ajustada a la dimensión del problema.

La complementariedad que ofrecen las tecnologías es crucial para su implantación en el Parque Porcino. La acción conjunta logra una solución óptima para la gestión de los residuos generados y a su vez las mejores prestaciones para los habitantes del parque.

Los orines son fundamentales para diluir la materia orgánica que se quiere digerir y de esta manera obtener el grado de humedad requerido por dicha tecnología. El orín generado por los cerdos es suficiente para conseguir este objetivo e incluso pueden existir excedentes, siempre y cuando lo primero que se realice, antes de implantar los sistemas pertinentes, sea garantizar la recogida del mismo, evitando las filtraciones al subsuelo y con un buen sistema de canalización. Esto se puede lograr con suma facilidad en la granja estudiada, pues está construida totalmente en pendiente y la mayoría de porquerizas utilizadas están pavimentadas. De esta manera un sistema de tuberías canalizaría los orines hasta la parte inferior de la granja donde estos serían un



ingrediente fundamental para lograr un material para alimentar el digestor con un grado de humedad óptimo.

El proceso de D.A. es fundamental para la gestión de residuos que queremos realizar en el parque porcino, ya que:

- Degrada la materia orgánica consiguiendo estructuras más simples, de manera que esta puede ser más fácilmente absorbida por el suelo (mejor capacidad fertilizante).
- Proporciona un gas (biogás) con un alto contenido en metano (más del 60%) que puede ser utilizado como combustible.
- Logra una considerable reducción de patógenos.
- Su instalación y mantenimiento suponen una inversión moderada. [20]

Pese a ello se considera que el proceso de D.A. no es suficientemente completo para ser el único sistema en funcionamiento en el parque, de manera que se han buscado tecnologías que compensen las “deficiencias” que presenta este sistema:

- Eliminación de patógenos insuficiente dependiendo de la reutilización que le queramos dar al efluente líquido o sólido obtenido (riego de plantas para consumo, plantas ornamentales, limpieza...)
- Poca capacidad para absorber excedentes en la producción de heces (por la capacidad limitada del digestor).
- Altas posibilidades de fallos en el funcionamiento de la tecnología (principalmente hasta lograr un régimen estacionario) por ser una tecnología “compleja”. De producirse un fallo no tendríamos salida para los residuos generados.
- Bajo porcentaje de eliminación del nitrógeno (N) mineral. [25]

Las tecnologías encargadas de cubrir estas deficiencias son el compostaje y los filtros verdes. Se han seleccionado éstas porque mantienen la filosofía que buscamos para los soluciones propuestas: moderada inversión inicial, bajo coste de mantenimiento, complementaria con la D.A., tecnología relativamente sencilla y garantizan la calidad del producto obtenido.



El esquema aproximado del tratamiento de los residuos (heces y orines) en la granja lo encontramos detallado en la Figura 4.2.

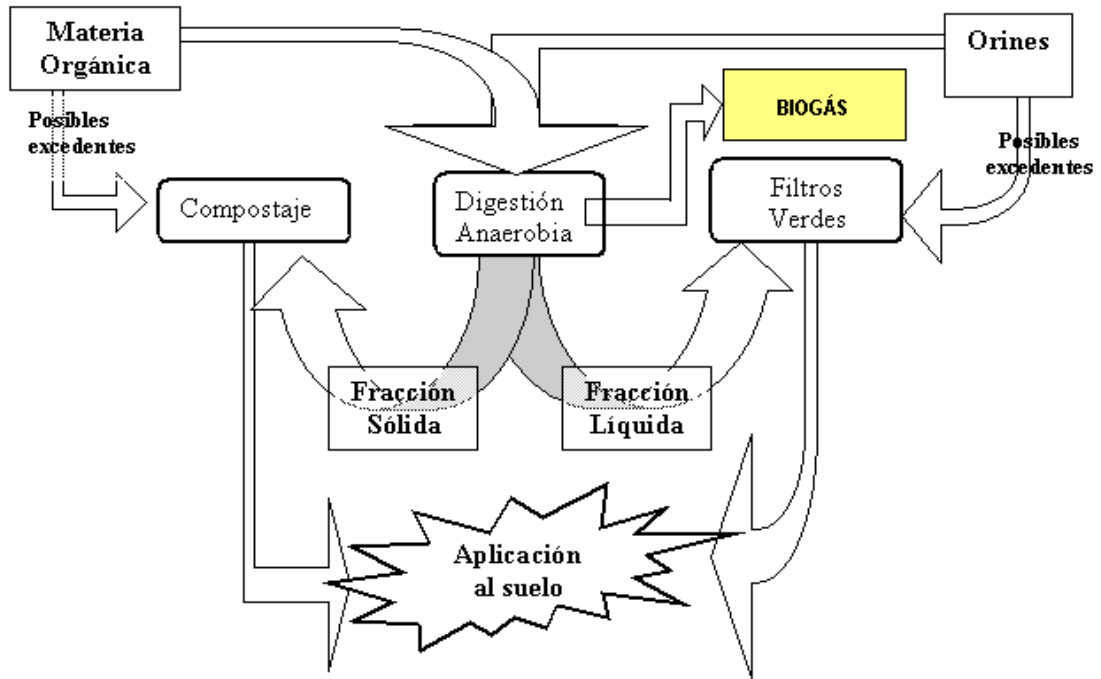


Figura 4.2. Tratamiento de los R.O.

Con este tratamiento, en el que se combinan diferentes tecnologías (D.A., compostaje, filtros verdes) se pretende lograr una gestión eficiente de los R.O. generados en la granja proporcionando además las mejores prestaciones para los usuarios del S.G.R. (Sistema de Gestión de Residuos). Con este funcionamiento se lograrían cubrir las posibles deficiencias de la D.A.:

- Los excedentes debidos a un mal funcionamiento del sistema de D.A. o a una sobreproducción de heces y orín serían cubiertos inmediatamente por los procesos de C.A. y F.V.
- Mediante el tratamiento de C.A. que se le daría a los R.O. después de ser digeridos (D.A.) se lograría el grado de eliminación deseado del N mineral.
- Con ambos tratamientos (C.A. y F.V.) se logrará el grado de eliminación de patógenos deseado, de manera que la fracción sólida podrá ser aplicada al suelo con seguridad y buenos resultados fertilizantes y la fracción líquida podrá ser utilizada para riego o limpieza de porquerizas.



En la tabla 4.8. se realiza una comparativa de las tecnologías seleccionadas en la que se muestra las características de ambas. Esta tabla fue fundamental para seleccionar las tecnologías que posteriormente se llevarían a estudio de manera combinada:

Tabla 4.8. Digestión anaerobia vs. Compostaje [20]

	Compostaje aerobio (CA)	Digestión anaerobia (DA)	Observaciones
Energía	Consumidor neto de energía	Productor neto de energía	El CA contribuye a mayores emisiones de CO2 al consumir energía fósil
Productos finales	Compost	Fangos compostables CH4	La DA com tal, requiere de postratamiento para producir compuesto
Complejidad	Tecnología sencilla	Tecnología compleja	Esto implica mayores inversiones para la DA.
Higienización	Asegurable si se mantiene un buen control	Asegurable si el proceso es termofílico	
Requisitos de fracción vegetal (restos de poda)	Es necesario	No es necesario.	En el postratamiento, a la DA puede ser necesaria, aunque hay soluciones alternativas
Emisiones en aguas	Producción de lixiviados en función del contenido inicial de agua del sustrato. Necesario tratamiento.	Producción de aguas residuales. Necesario tratamiento.	En ambos casos, es necesario un sistema de tratamiento de aguas.
Olores en el área de recepción y pretratamiento	El aire a tratar puede ser utilizado para el proceso.	El aire a tratar no puede tener utilidad previa	Las emisiones de amonio son superiores en el CA
Olores en el área de tratamiento	Necesario tratamiento	No hay emisiones durante el proceso	
Olores en el área postratamiento l almacén	Reducida si es correcta la fase de descomposición	Necesario tratamiento	
Emisión de CO²	Mucha	Baja	Al quemar el CH4, el proceso de DA se equipara al CA pero este sirve para disminuir el consumo de una fuente fosil de energía, y por lo tanto contribuye a una disminución global de emisiones.
Espacio ocupado	Depende del sistema escogido, pero siempre es mayor que la DA.	Poco	Este factor puede tener un interés económico o paisagístico. En el último caso puede tener un impacto mayor en la verticalidad de las construcciones en la DA.
Experiencia	Elevada	Reducida	La experiencia de la DA se considera industrialmente contrastada
Dificultad en la gestión	Reducida	Más elevada	Es necesario una mayor especialización de los gestores de la planta.



Otro de los guiones seguidos en la elección de la tecnología y la adecuación de la misma al terreno de implantación ha sido “las preguntas clave para el análisis de factibilidad de la tecnología de digestión anaerobia” (Tabla 4.9) [26]. Estas preguntas sirvieron para estudiar la adecuación de la digestión anaerobia al presente proyecto.

Tabla 4.9. Preguntas clave para la implantación D.A. [26]

¿Existe realmente un problema que la tecnología del biogás pueda resolver?
Existe un grave problema de gestión de residuos orgánicos y de falta de energía mínima para cocinar que la tecnología puede solucionar.
¿Se garantiza una cantidad de sustrato orgánico suficiente y continuo?
El sustrato está garantizado por tratarse de una granja donde se crían cerdos de manera continuada.
¿Está resuelto la financiación del proyecto?
La financiación para dicho proyecto es algo compleja por tratarse de un proyecto de cooperación. La parte inicial (experimental) está resuelta, la financiación siguiente dependerá en parte de los resultados experimentales.
¿Para plantas sin calefacción: son favorables los factores climáticos?
Los factores climáticos pueden ser uno de los impedimentos, pero se analizará experimentalmente la factibilidad ya que en condiciones más adversas la tecnología ha funcionado (p.e. caso de Yanaoca)
¿En zonas áridas: se asegura el abastecimiento continuo de agua?
Éste es otro de los puntos críticos del estudio. El agua es escasa en la zona, motivo por el cual una de las primeras medidas a tomar es garantizar una óptima recogida del orín para minimizar el consumo de agua externa.
¿Se acepta culturalmente el uso de las excretas humanas para el biodigestor?
No existen grandes problemas culturales en la zona, aunque si que puede resultar algo impactante. Por el momento se desestima su utilización.
¿Se acepta el uso del biogás, obtenido a partir de excretas humanas, para cocinar?
En el momento en que esto se produzca y se observe la gran utilidad del gas para solventar necesidades primarias de la población se cree que no habrá mayores problemas.



¿Se consideran los factores ambientales en la toma de decisiones política?

Se consideran los factores ambientales, se creen parcialmente adversos, pero se ha decidido trabajar experimentalmente para analizar la factibilidad, realizando labores de aislamiento como la creación de un invernadero para nuestros digestores.

¿Hay suficiente mano de obra que pueda convertirse en expertos de biogás en la zona?

No se han buscado expertos, sino gente interesada y dispuesta a colaborar e innovar. Inicialmente pocos, pero con el paso del tiempo y con la propagación de los resultados entre la población se ha logrado involucrar a un mayor número de personas y se ha trabajado para hacerlos capaces de proseguir con la tecnología.

¿El número de usuarios de biogás potenciales justifican un programa de biogás?

Sí, se empieza a pequeña escala, trabajando únicamente con uno de los granjeros del parque porcino, pero las posibilidades de implantación aumentan con los resultados y la difusión.



5 Trabajo de campo

El 10 de julio del 2006 dieron inicio el conjunto de experiencias para analizar la viabilidad de las tecnologías seleccionadas, tanto para analizar su complementariedad como para valorar la adecuación al terreno.

Mientras se realizaban las experiencias relacionadas con el proceso de D.A. y que se detallan en el siguiente apartado se investigó igualmente con los procesos de compostaje y Filtros Verdes. El objetivo del presente proyecto es realizar un estudio de viabilidad de la tecnología de D.A. en el contexto de Ventanilla, pese a ello también se realizaron experiencias que trataban de dar una solución inmediata a la generación de R.O. en la granja, que hasta el momento eran simplemente apilados y quemados (Figura 5.1). Para dar salida a estos R.O. se realizaron pilas mezcladas con algunos restos vegetales encontrados en la zona (ramas y hojas secas entre otros) y humidificadas con los orines recogidos con cubos, ya que la canalización para la recogida de orines no se realizará hasta conocer los resultados del presente estudio de viabilidad y hasta lograr los fondos necesarios.



Fig. 5.1 Quema de R.O. en Ventanilla



Esta salida que se dio temporalmente a la generación de R.O. (Figura 5.2) ha sido controlada en todas sus variables fundamentales mediante la realización de unas tablas de control en las que se debe introducir:

- fecha
- grado de humedad (la prueba consiste en apretar un puñado de material compostado y observar la consistencia del mismo después de ser apretado)
- En función del grado de humedad si se ha regado más o menos la pila
- volteado en caso que la fecha coincida con la fecha indicada para voltear
- temperatura interna (mediante colocación de un termómetro hundido en la pila)

El control realizado sirve igualmente para comparar la aplicación de dicha tecnología con la tecnología de D.A. y a su vez para contrastar la viabilidad de implantación de cara al futuro.



Fig. 5.2. Pilas de compost en Ventanilla

El estudio de viabilidad de la tecnología de D.A. consta de dos experiencias, la primera de ellas fue realizada con bidones de 5 litros y la segunda trata de simular el proceso a mayor escala (225 litros). Las dos experiencias se iniciaron con el mismo objetivo: constatar la factibilidad de implantación de la tecnología de digestión anaerobia en la zona y optimizar de la misma.



5.1 Primera experiencia

La primera experiencia se inició el día 10 de julio del 2006 con la siguiente planificación:

Se determinó llevar a cabo 6 pruebas simultáneas utilizando el biodigestor modelo tipo Batch (utilizando garrafas de agua de 5 litros) cargándolo una sola vez en forma total, en este tipo de biodigestor la descarga se efectúa cuando han dejado de producir gas combustible. [25] En estos 6 experimentos se trabajó duplicando cada uno de ellos, de manera que se pudieran detectar posibles anomalías y en el caso de producirse desestimar el experimento que las presenta teniendo en cuenta únicamente su réplica. Siendo así la composición de la biomasa para cada biodigestor se presenta en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1. Composiciones en la primera experiencia

Ubicación	Bidón	Componentes	Volumen (litros)	Porcentaje (%)
Al aire libre	1A	Excretas de cerdo	1.5	50
		Agua	1.5	50
	1B	Excretas de cerdo	1.5	50
		Agua	1.5	50
Al interior del suelo	2A	Excretas de cerdo	1.5	50
		Agua	1.5	50
	2B	Excretas de cerdo	1.5	50
		Agua	1.5	50
	3A	Excretas de cerdo	0.75	25
		Orines	0.75	25
		Lodos	1.5	50
	3B	Excretas de cerdo	0.75	25
		Orines	0.75	25
		Lodos	1.5	50



Las composiciones de las 6 pruebas fueron determinadas por las siguientes razones:

- **Pruebas 1A y 1B** se realizaron por ser la combinación más acorde con la situación de la granja, utilizar una mezcla únicamente en base a excretas y agua, elementos que se encuentran siempre a disposición. La ubicación al aire libre se acordó para poder tener la experiencia de un biodigestor a condiciones ambientales del lugar.
- **Pruebas 2A y 2B** la combinación es la misma pero se realiza al interior del suelo para poder determinar si estas condiciones resultan propicias para mejorar la calidad y la productividad del gas, además de las diferencias que pudieran existir con respecto a la experiencia al aire libre (pruebas 1A y 1B). Previo a colocar los biodigestores dentro del suelo, se calentó la mezcla en baño maría hasta alcanzar una temperatura de 34°C en ambos casos con la finalidad de preservar el mayor tiempo posible una alta temperatura al inicio del proceso de digestión y mantener una estabilidad térmica por mayor tiempo.
- **Pruebas 3A y 3B** estas dos pruebas resultan especiales ya que son muy distintas a las anteriores, en primer lugar se coloca un elemento activador del proceso, se coloca lodos del mismo día de una planta de tratamiento anaerobio de aguas residuales, este elemento se convierte en el inóculo de la mezcla. Además se colocan excretas de cerdo disueltas en un 50% por orines también de cerdo. Esto se realiza con la finalidad de probar la incorporación del uso de orines dentro del proceso de biodigestión. El uso de orines para lograr la humedad requerida puede resultar la mejor solución ya que el agua escasea en la zona. Previo a colocar los biodigestores dentro del suelo, se calentó la mezcla en baño maría hasta alcanzar, en el caso de la prueba 3A una temperatura de 43°C y en el caso de la 3B una temperatura de 45°C con la finalidad de preservar el mayor tiempo posible una alta temperatura al inicio del proceso de digestión y mantener una estabilidad térmica por mayor tiempo.



Construcción

La construcción de todos los biodigestores y los medidores de gas denominados gasómetros se realizó en dos días, correspondientes al 9 y 10 de julio del 2006. Para ello se utilizaron los siguientes materiales:

1. 6 bidones de agua de 5 litros
2. 3 termómetros de medición máxima 50°C
3. 6 metros de tubo de silicona
4. 6 jarritos para agua
5. 6 buretas de 25 ml
6. 1 tubo de silicona
7. 1 tubo de poliuretano
8. navaja
9. guantes
10. jeringa sin aguja
11. encendedor
12. tubo de cartón
13. ½ metro de tubo de metal

Sistema del biodigestor

El pequeño bidón de 5 litros, el cual hará el papel del biodigestor en pequeña escala, se perforó en el lateral a un nivel medio por donde se colocó el termómetro por donde se lee la temperatura interna del biodigestor, el orificio donde se coloca el termómetro es sellado con poliuretano y silicona. [25]

La tapa del bidón es acondicionada para los fines haciéndole una incisión en la parte superior por donde se colocó un tubo de metal herméticamente unido a la tapa el cual a su vez por el lado superior esta unido a la manguera de silicona que conduce el gas que se genera hacia el medidor de gas o “gasómetro”.



El “gasómetro” fue elaborado con una bureta invertida sobre un depósito lleno de agua, la manguera que conduce el gas se conectó a la parte inferior de la bureta con un pequeño escape generado por una astilla de madera para permitir el paso del agua dentro de la bureta usando una jeringa sin aguja. Al estar sumergida la unión de la manguera a la bureta (llena de agua) dentro del depósito con agua, se permite que el gas ingrese por el tubo hacia la bureta desplazando por presión el agua que se encuentra dentro de la misma. La bureta calibrada nos da el volumen de gas que produjo el biodigestor. (Figura 5.3 y Figura 5.4) [25]

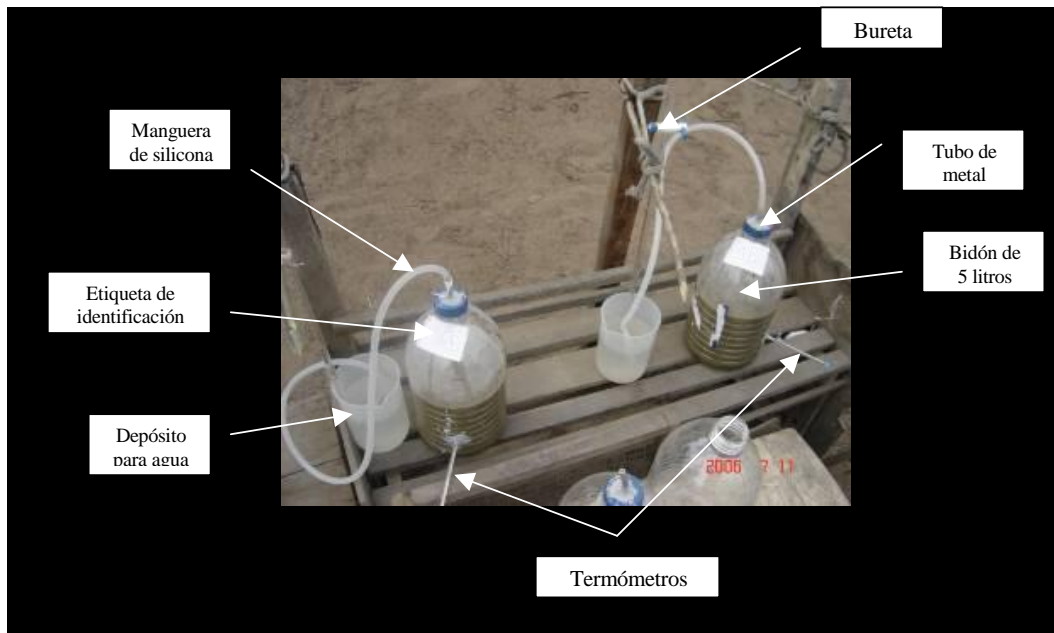


Figura 5.3. Partes biodigestor al aire libre

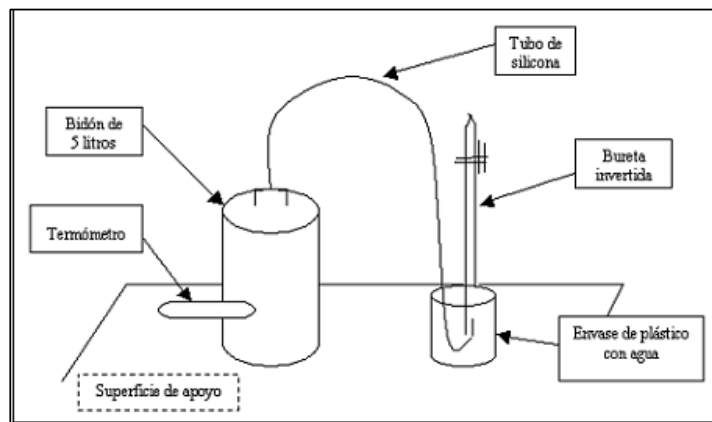


Figura 5.4. Esquema biodigestor al aire libre



De los biodigestores colocados en el interior del suelo tan sólo uno de ellos cuenta con termómetro ubicado internamente (Figura 5.5) ya que se considera que la temperatura interna en cada bidón al estar influenciado por la temperatura del suelo será constante para todos sin diferencias significativas en su variación.

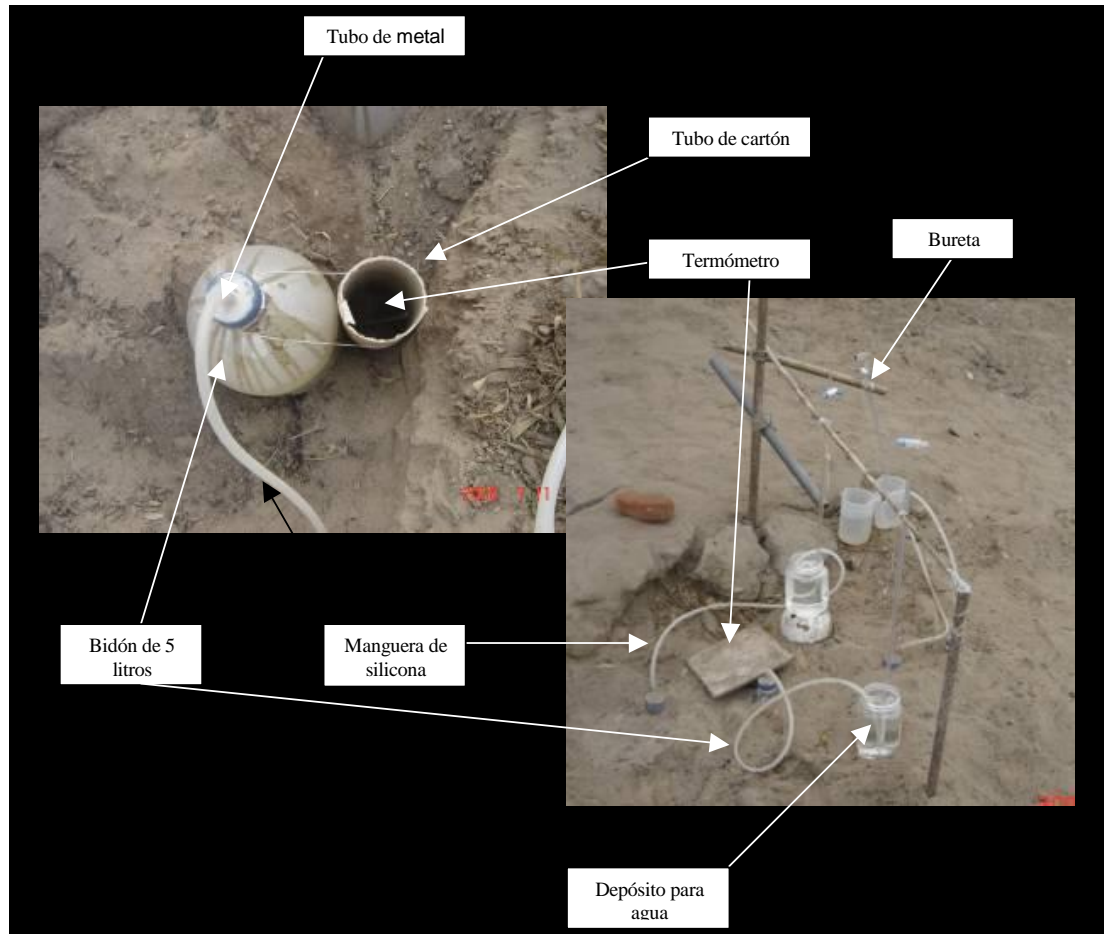


Figura 5.5. Partes biodigestor enterrado



Resultados de los análisis

Las muestras fueron llevadas el día 10 de Julio del presente año al Laboratorio de Análisis de Agua, Suelo y Medio Ambiente, de la Facultad de Ingeniería Agrícola de la Universidad Nacional Agraria La Molina. Los resultados fueron entregados el 26 de Julio y se presentan en la Tabla 5.2

Tabla 5.2. Resumen del resultado de los análisis

Nº Lab	Nº Campo	DQO (mg O ₂ /L)	Sólidos Totales (gr/L)	Sólidos Volátiles (mg/L)	pH
3144	M-1 Excretas de cerdo + orines	181,334.78	153.85	110.77	6.70
3145	M-2 Lodos de aguas residuales	84,190.39	108.57	57.15	6.66
3146	M-3 Excretas de cerdo + agua	196,446.01	121.67	90.83	6.40

Conclusiones primera experiencia

Siendo estos los resultados obtenidos la primera experiencia se considera no significativa para la obtención de información necesaria para lograr un mayor conocimiento del proceso y lograr así el diseño apropiado para las condiciones ambientales y paisajísticas del lugar.

La primera experiencia no nos ha aportado datos de valor dado que, por lo que se ha observado, el funcionamiento no ha sido el adecuado. Los perros de la zona (zona con escasez de agua como se comentó en apartados anteriores) en su búsqueda de agua



dañaron los experimentos realizados y el funcionamiento de los mismos jamás fue el esperado. El agua del gasómetro circuló hasta el digestor, de manera que algunos de ellos llegaron a llenarse de agua, variando por completo las condiciones iniciales de experimentación. Inicialmente, mientras no hubo problemas, se podía observar una tendencia en la producción de biogás como se observa en los gráficos. Pero finalmente se produjeron los percances perdiendo toda la fiabilidad de la prueba.

Otra de las razones por las cuales no llegó a funcionar esta experiencia es la utilización de un inóculo inadecuado. Las bacterias metanogénicas jamás llegaron a aparecer, dado que al no introducir un inóculo en el que estuvieran presentes, éstas debían generarse en el digestor, aumentando así considerablemente el tiempo que se debía pasar para evidenciar presencia de metano en el gas generado.

Por estas razones, basándonos en la evaluación a todo el proceso realizado para la primera experiencia, se considera necesaria la realización de más pruebas como segunda experiencia. Pruebas que resultan del estudio de los resultados obtenidos así como de la asesoría de profesionales y especialistas que se encuentran trabajando en investigaciones sobre el tema.

De la primera experiencia únicamente sacamos en positivo la ayuda a decidir la composición de la que sería la segunda experiencia, basándonos únicamente en la evolución de la experiencia cuando el funcionamiento no se había visto alterado por factores externos.

5.2 Segunda experiencia (agua como diluyente)

5.2.1 Introducción y objetivos

La segunda experiencia se inició el 10 de agosto del 2006. Antes de iniciar esta nueva experiencia se analizó cuales debían ser las características de los biodigestores que se construirían, entre estas estaban, el volumen, la biomasa que debería ir dentro de los biodigestores, el volumen de sus componentes, el sistema de conducción del gas, el



sistema de medición y acumulación del mismo. Según esto se determinaron las siguientes medidas:

1. El flujo de biodigestor sería el mismo. Biodigestores tipo Batch.
2. Los biodigestores deberían ser de un tamaño mucho mayor al usado anteriormente para que la cantidad de gas generado sea considerable y facilitar su medida, manipulación y análisis. Siendo así se decidió utilizar bidones de PVC de 225 litros.
3. Las mezclas deberían tener como inóculo, activador del proceso, la misma composición y en el mismo volumen, siendo la variable entre cada biodigestor las cantidades de purín que ingresaran al sistema así como su dilución y el elemento con el cual se diluyera ya sea agua u orines de cerdo. También se pensó en adicionar un elemento como residuos que como ya se mencionó son trasladados de los restaurantes y resulta un elemento disponible para ser utilizado. Las pruebas entonces serían tres por ser tres el número de combinaciones con respecto a la biomasa que se realizarían.
4. Esta vez el sistema incluiría además de los mecanismo necesarios para medir la temperatura interna de cada biodigestor, también se implementaría una llave para la salida del líquido necesario para poder medir pH. También una salida del tubo de conducción del gas para poder medir la presión.
5. La construcción de un “gasómetro”, el cual pudiera almacenar el gas generado diariamente y obtener a su vez una lectura del volumen producido. Este “gasómetro” también estaría acondicionado con una llave que serviría para facilitar la manipulación del gas, ya sea para reconducción o pruebas, así como facilitar la medida de presión dentro del mismo.
6. Se acondicionaría un área dentro del terreno para que funcionara como invernadero para los biodigestores, con el fin de generar un incremento de temperatura que resultara beneficioso para el proceso de biodigestión.

El cálculo de los volúmenes que debían ingresar a cada biodigestor se estimaron de tal manera que se pudiera tener una experiencia utilizando purines muy diluidos (bajando el % de sólodos), purines con mayor concentración y probar la experiencia con residuos de restaurantes y orines como elementos alternativos de uso, así como tomando en cuenta el



uso de la mayor cantidad de elementos que estaban a disposición y sus volúmenes disponibles. Estas composiciones se encuentran en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3. Composición segunda experiencia

Ubicación	Biodigestor	Componentes		Volumen (litros)	Porcentaje (%)
Dentro del invernadero	1	Inoculo	Purín (50% purín - 50% agua) antigüedad de 1 mes	42.60	33.7
			Lodos antigüedad de 1 mes	5.3	4.2
			Rumen del día anterior	18.5	14.6
		Mezcla	Purín del día anterior	35.6	28.2
			Orines del mismo día	14.4	11.4
			Residuos de restaurante, antigüedad 1 mes	10	7.9
	2	Inoculo	Purín (50% purín - 50% agua) antigüedad de 1 mes	42.60	33.7
			Lodos antigüedad de 1 mes	5.3	4.2
			Rumen del día anterior	18.5	14.6
		Mezcla	Purín del día anterior	18	14.2
			Agua	42	33.3
	3	Inoculo	Purín (50% purín - 50% agua) antigüedad de 1 mes	42.60	33.7
			Lodos antigüedad de 1 mes	5.3	4.2
			Rumen del día anterior	18.5	14.6
		Mezcla	Purín del día anterior	36	28.5
Agua			24	19	



5.2.2 Metodología

Para la etapa de construcción los materiales que se utilizaron incluyeron:

- 3 Bidones de 225 litros con aros de metal de seguridad.
- 3 cilindros de metal
- 3 baldes de 25 litros
- 4 metros de manguera de plástico transparente (1/2 pulgada)
- 5 metros de manguera para gas
- 2 metros de manguera de silicona (2mm)
- Conexiones para gas
- Teflón
- 2 Tubos de silicona
- 2 Tubos de poliuretano
- 2 Tubos de masilla formadora de empaquetaduras
- 2 tubos de Terokal
- 6 válvulas de bola de metal (llaves)
- 3 válvulas de bola de plástico
- 6 palos de madera
- 5 metros de manga de plástico negro
- 5 metros de manga de plástico transparente
- 6 Corchos
- 3 cintas métricas
- 6 reglas milimetradas
- Globos
- Abrazaderas y bridas
- Herramientas varias



Procedimiento para la construcción del invernadero

Los pasos que se siguieron para la ubicación y construcción del invernadero son los siguientes:

1. Se identificó dentro de la granja del Sr. Jorge Iparraguirre un tanque de agua sin techo construido hace varios años en ladrillo y cemento pero que en la actualidad se encontraba sin uso debido a la construcción de otros dos tanques de concreto.
2. Conversando con el Sr. Iparraguirre se obtuvo la autorización para acondicionar el área y convertirla en un pequeño invernadero donde se pudiera colocar los biodigestores con sus respectivos medidores de gas “gasómetros”.
3. Para acondicionarlo se inició la labor rompiendo una de las paredes del tanque de tal manera que quedara una abertura lo suficientemente grande para que sirviera de puerta de ingreso. (Imagen 5.1.)
4. Se procedió luego a la reparación con cemento de todas las grietas y fisuras que se habían producido en el tanque con el paso del tiempo, así como los bordes de la puerta que se acababa de abrir.
5. Después de limpiar toda el área interna se colocó en el piso una lámina de plástico negro y el techo se elaboró en base a una lámina de plástico transparente unido a palos de madera que sirvieran de soporte y peso para colocarlo sobre los bordes superiores de las paredes.
6. Se construyó también una puerta de plástico transparente con palos de madera que sirviera para evitar que el calor saliera por esta abertura.
7. La finalidad es que la radiación y calor pudiera ingresar a través de la manga de plástico transparente y fuera retenido por la manga de plástico negro en el suelo del ahora invernadero.





Imagen 5.1. Tareas de construcción del invernadero

Procedimiento para construcción de los biodigestores:

Los pasos que se siguieron para la construcción de los biodigestores son los siguientes:

1. Se hicieron dos orificios paralelos en el tercio inferior del bidón. A uno de estos orificios se conectó herméticamente la llave de salida de líquido para medir pH. Al segundo orificio se conectó también herméticamente el mecanismo para medir temperatura, este consta de un tubo delgado de plástico transparente anudado a un borde y sellado con silicona (parte que va dirigida al área interna del cilindro).
2. Se abrió un orificio en la parte superior de la tapa del bidón de PVC, por este orificio se conectó la llave y la manguera para gas hasta el gasómetro.
3. A mitad de la manguera para conducción de gas se colocó una T de plástico la cual conecta por su parte superior con una manguera que va hacia el manómetro de paso.
4. Construcción del manómetro de paso.



5. Construcción del medidor de gas “gasómetro”
6. Construcción del manómetro para la presión interna del “gasómetro”
7. Se unieron todas las partes utilizando masilla formadora de empaquetaduras, teflón, poliuretano y silicona para sellar totalmente todos aquellos orificios que puedan ser causantes de fugas posteriores.

El resultado de todos estos pasos seguidos para la construcción se presenta en la Figura 5.8 y en la Figura 5.9.

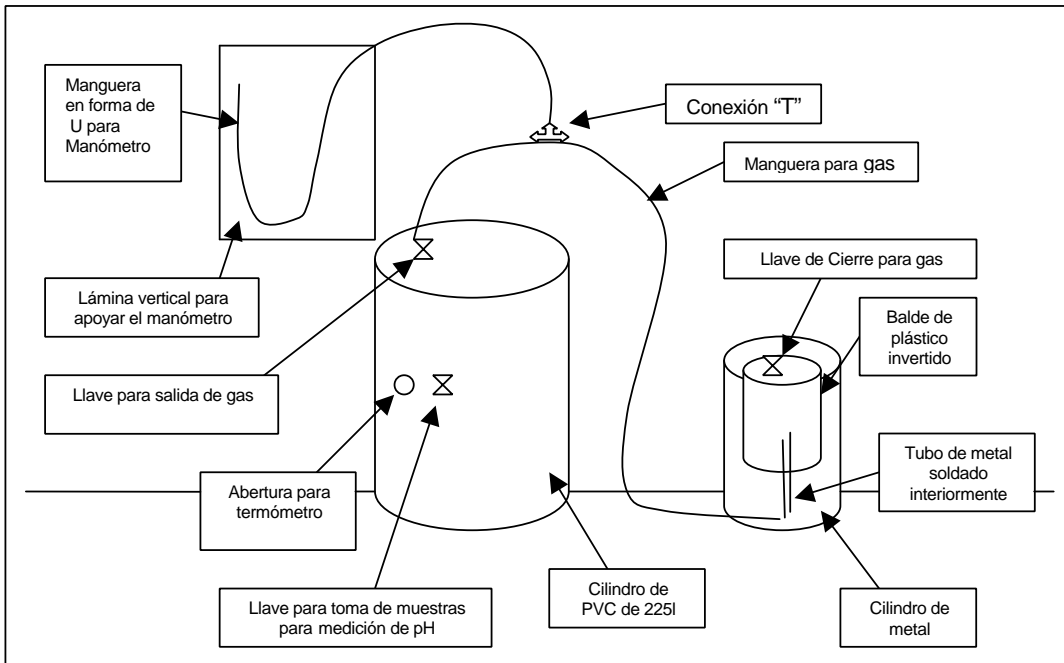


Figura 5.8. Esquema del montaje del biodigestor



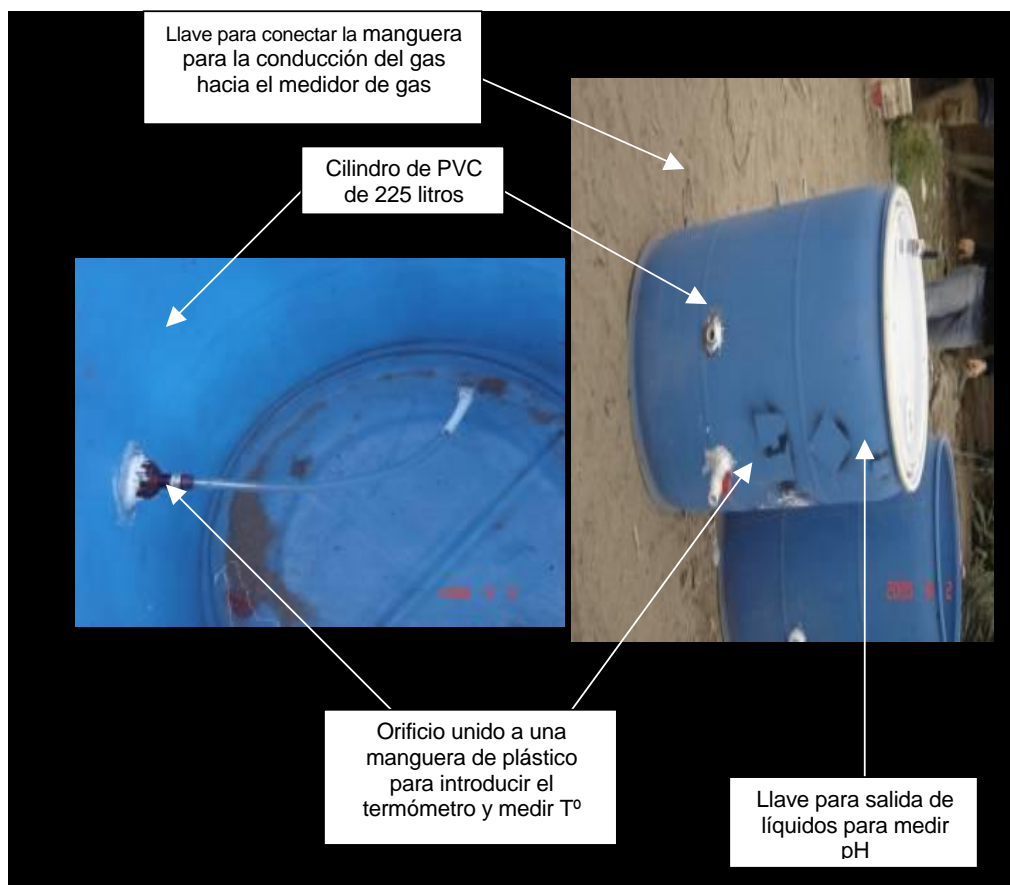


Figura 5.9. Montaje del biodigestor

Procedimiento para la construcción del “gasómetro”

Los pasos que se siguieron para la construcción de los gasómetros son los siguientes:

1. Se acondicionó de un cilindro de metal de 40 cm de diámetro y un balde plástico de diámetro menor para ser colocado de forma invertida dentro del cilindro de metal. Esto para cada uno de los biodigestores.
2. Un tubo de metal de 1 m de longitud y 1 cm de diámetro fue soldado y sellado con el cilindro de metal de la siguiente manera que se colocó uno de los extremos pegado a la base inferior del cilindro llegando hasta la mitad del mismo por donde ingresa hacia al interior de forma recta hasta una altura de 30 cm, como continuación a este tubo se colocó uniéndose con abrazaderas un tubo de silicona que subía 20 cm más.



3. En el balde de plástico fue abierto un orificio por donde se colocó la conexión necesaria para la llave de paso o cierre del gas, esto con el objetivo de tener una salida por donde capturar el gas y realizar las pruebas respectivas de reacción al fuego, olor y presión.
4. Se llenó de agua el cilindro de metal previamente sellado, colocando de modo invertido el balde de plástico con la llave de salida del gas abierta, de esta manera con un poco de presión hacia abajo el aire contenido dentro del balde era expulsado hasta que el agua llegara al límite superior del balde.
5. Midiendo el nivel en el que el balde ya sin aire queda con respecto al nivel del agua, se colocó el cero de una cinta métrica, la cual fue pegada a lo largo del balde que se introduce en el agua. Con la cinta métrica hallamos así la altura que se elevó el balde por el ingreso del gas y con este dato y el del radio obtenemos el volumen que ingresó de gas. (Figuras 5.10 y 5.11)
6. Finalmente se procedió a conectar la manguera de conducción del gas que va desde el biodigestor hacia el tubo de metal soldado a la base del cilindro de metal.

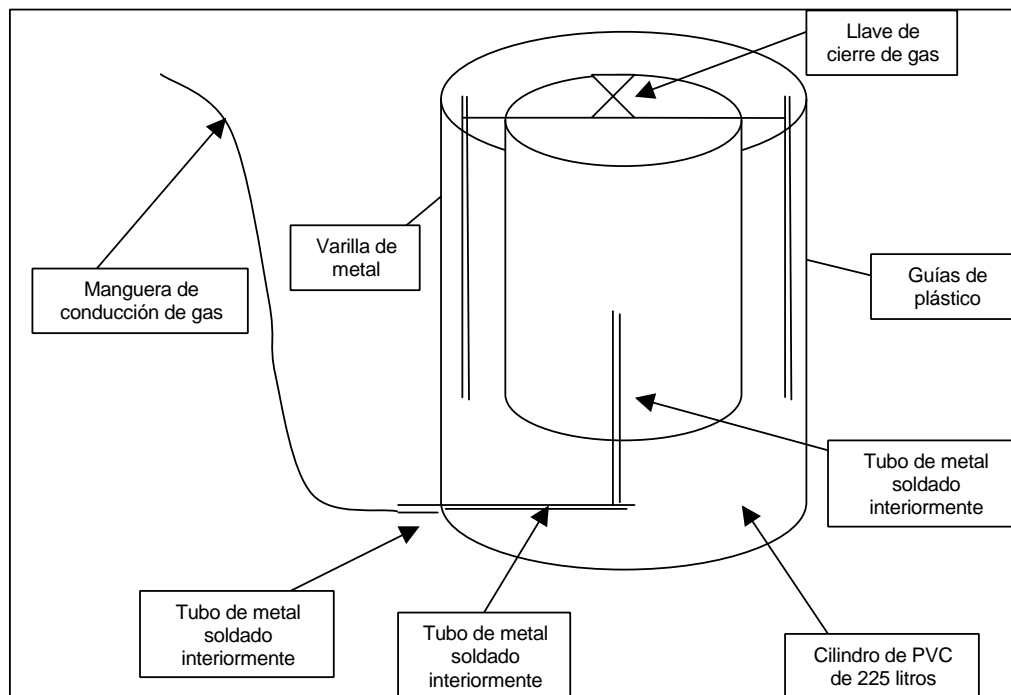


Figura 5.10. Esquema del montaje del gasómetro



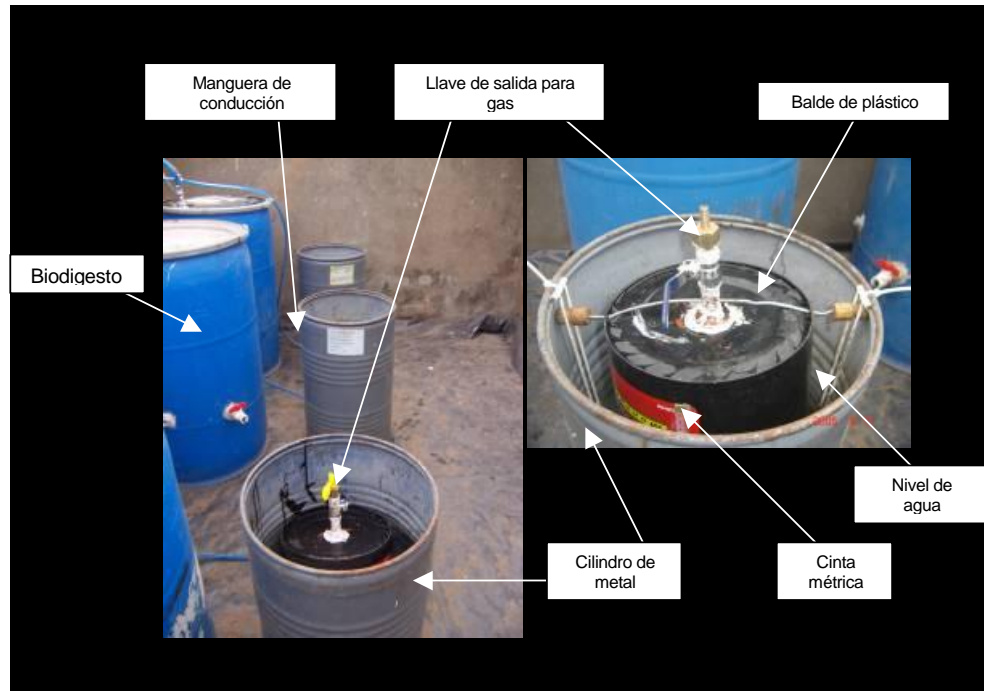


Figura 5.11. Partes del gasómetro

Procedimiento para la construcción del manómetro de paso

Los pasos que se siguieron para la construcción de los manómetros de paso son los siguientes:

1. La T de plástico colocada a la altura media de la manguera de conducción del gas que va desde el biodigestor hacia el “gasómetro” nos sirvió para poder unir de modo seguro una manguera de plástico transparente la cual se condujo hacia la pared delantera del invernadero en donde se colocó en forma de U pegada a la pared.
2. Dentro de la manguera ya colocada en forma de U, se introdujo un poco de agua, la cual quedaría al mismo nivel a ambos lados de la U al encontrarse en el momento a presión atmosférica.



3. Siendo así se colocó a cada uno de los lados una regla milimetrada. Para el lado izquierdo se ubico el cero desde la altura del nivel del agua hacia abajo mientras que del lado derecho se colocó el cero desde la altura del nivel del agua hacia arriba.
4. Las reglas milimetradas permiten conocer fácilmente la diferencia del nivel del agua que habría provocado por la presión del gas.
5. Para evitar que el agua se evaporara debido al calor del día se colocó como tapón un globo el cual sirve como medida de seguridad. Si la presión de gas aumentara por alguna razón, el manómetro de paso serviría para que el gas pudiera ser expulsado por este lado.

El resultado de los pasos descritos se observa en las Figuras 5.12 y 5.13.

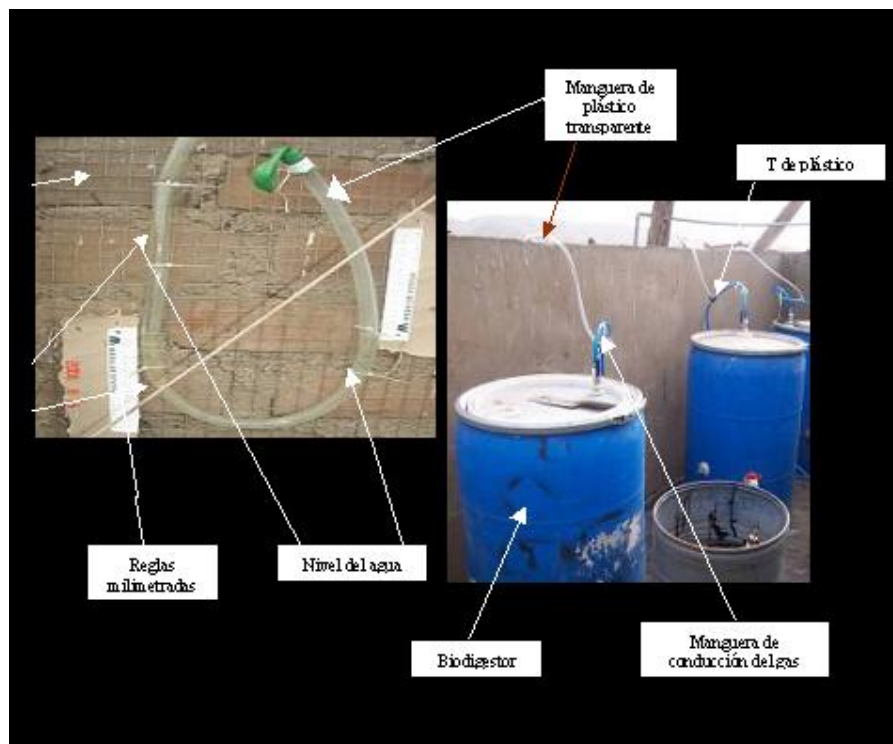


Figura 5.12. Partes del montaje del manómetro



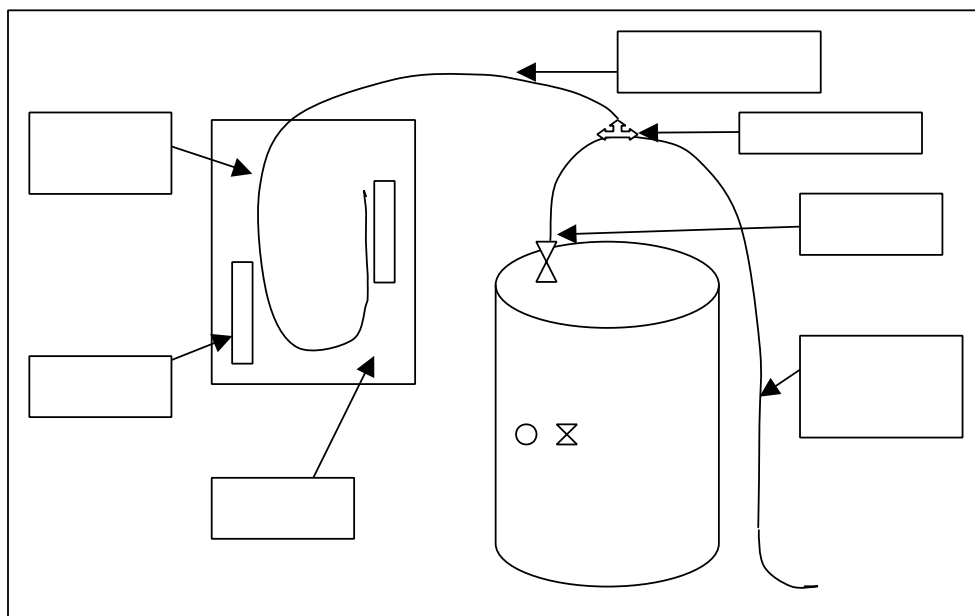


Figura 5.13. Partes del manómetro y su conexión

Procedimiento para la construcción del manómetro de presión interna

Los pasos que se siguieron para la construcción del manómetro de presión interna son los siguientes:

1. El procedimiento fue muy parecido al utilizado para el manómetro de paso al ser el mismo sistema de medición.
2. Una lámina de madera de 30 x 40 cm de longitud la apoyamos verticalmente sobre una base de madera también.
3. Se utilizó un tubo de plástico transparente de diámetro de 1 cm, cuyo extremo derecho fue colocado en forma de U apoyado sobre la lámina de manera colocada verticalmente, el otro extremo de la manguera fue unido a la conexión respectiva para que pudiera ser unida a su vez a la llave de salida de gas que se encuentra en la parte superior del balde de plástico del “gasómetro”



Los dos tipos de temperatura que se evaluaron fueron la temperatura ambiental y la temperatura interna de cada biodigestor, medida con un termómetro introducido mediante un tubo de silicona, al interior del biodigestor. La temperatura ambiental como se recordará ha sido incrementada gracias a la construcción de un invernadero donde se colocaron los digestores, siendo así la temperatura ambiente bastante alta con respecto al exterior, llegando hasta los 35.5°C en el día con una mínima de 22°C registrados por la noche. La variación de la temperatura es alta y se debe a las diferencias climáticas que hubo entre los días. La temperatura interna suele fluctuar entre los 21°C y los 24°C, con una media de 22°C para todo el proceso.

La variación de pH es registrada en base a la prueba que se realiza con el método práctico en el que se introducen tiras de papel de colores en la sustancia a evaluar para luego comprobar el cambio en la coloración del papel y compararla con los ya predeterminados para cada grado de pH. Este método fue considerado oportuno para la experiencia debido a su facilidad de uso, sin embargo se considera de baja precisión ya que se encuentra sujeta a la percepción del evaluador para diferenciar los colores de la tira de papel. Considerando esta limitación tenemos que varía permanentemente entre un nivel medio de 6.5 y 7, lo que significaría que el entorno en el que se han desarrollado las bacterias metanogénicas tiende a ser ligeramente ácido.

5.2.2.1 Análisis previos

Los análisis que se consideraron propicios para esta experiencia, son los siguientes:

- a. *Alcalinidad*: La acumulación excesiva de compuesto alcalino indica que la biomasa dentro del biodigestor corre riesgo de putrefacción en vez de degradación.
- b. *Sólidos Totales*: Aquellos componentes que resisten a la degradación biológica. La velocidad de biodegradación aumenta cuando se remueven estos sólidos.
- c. *Sólidos Volátiles*: Se refiere a la parte de sólidos totales que se volatilizan durante la reducción de toda la materia orgánica. En teoría, los sólidos volátiles contiene todos los compuestos orgánicos que pueden convertirse en metano.



- d. *pH*: El valor óptimo de pH está en el rango de 6.6 a 7.6 (Yongfu *et al.* 1989) para que las bacterias encargadas del proceso de digestión se desempeñen productivamente.
- a. *Calidad y composición del gas*: El gas producido por el biodigestor reacciona ligeramente al fuego por lo que se determinó importante realizar esta prueba.

La toma de muestras se realizó tomando un litro de cada uno de los siguientes componentes utilizando para esto las mezclas antes de ser introducidas en cada uno de los biodigestores.

- **Muestra N°1**: Purín inóculo y agua en relación 1/1. (Antigüedad de la mezcla: 08/07/06)
- **Muestra N°2**: Lodos de planta anaerobia de aguas residuales. (Antigüedad de lodos, 10/07/06).
- **Muestra N°3**: Purín de cerdo y agua en relación (40% purín – 60% agua Antigüedad de la mezcla: 10/08/06)
- **Muestra N°4**: Purín de cerdo y agua (70% purín - 30% agua Antigüedad de la mezcla: 10/08/06)
- **Muestra N°5**: Purín de cerdo con orines (28.2% purín - 11.4% orines Antigüedad de la mezcla: 10/08/06) y residuos de restaurantes (7.9% Antigüedad de la mezcla: 10/07/06)

Resultados de los análisis

Las muestras fueron llevadas el día 11 de Agosto del 2006 al Laboratorio de Análisis de Agua, Suelo y Medio Ambiente, de la Facultad de Ingeniería Agrícola de la Universidad Nacional Agraria La Molina. Los resultados (Anexo E) fueron entregados el 29 de Agosto con la descripción que encontramos en la Tabla 5.4.



Tabla 5.4. Resultados análisis previos

Nº Lab	Nº Campo	Alcalinidad del extracto (mg CaCO ₃ /L)	Sólidos Totales (gr/L)	Sólidos Volátiles (mg/L)	pH
3173	M-1 Purín inoculo	6,600.00	61.80	44.90	6.74
3174	M-2 Lodos inoculo	700.00	68.60	36.00	7.20
3175	M-3 Excretas de cerdo + agua (40-60)	3,500.00	81.90	62.00	6.35
3176	M-4 Excretas de cerdo + agua (70-30)	5,100.00	148.50	115.00	6.21
3177	M-5 Excretas de cerdo + orines + residuos (28.2-11.4-7.9)	4,000.00	107.00	85.50	6.29

- M-1 Purín inoculo:** Se optó por hacer este análisis temiendo que la alcalinidad pudiera provocar la inhibición del proceso biológico. Los resultados obtenidos demuestran que el grado de la alcalinidad se encuentra dentro de un rango aceptable como para que la mezcla posea la capacidad tampón necesaria. La cantidad de sólidos totales aunque menor que en la primera experiencia resultan ser aún más altos de lo recomendable lo que posiblemente haga que disminuya la cantidad de gas producido. La proporción de sólidos volátiles con respecto a la de los sólidos totales es aceptable. El valor del pH se considera bajo con respecto al recomendado.
- M-2 Lodos de aguas residuales:** La alcalinidad obtenida bordea el límite inferior ideal para que la mezcla tenga capacidad de autorregular el pH. La cantidad de



sólidos totales sigue considerándose superior al nivel recomendado. La proporción de sólidos volátiles con respecto a la de los sólidos totales es también buena. El valor del pH en este caso es bueno aunque se encuentra a su vez bordeando el límite superior en los que las bacterias del digestor trabajan.

- **M-3 Excretas de cerdo + agua (40-60):** El nivel de alcalinidad también se encuentra entre los rangos aceptables. Al igual que en el análisis anterior la cantidad de sólidos totales sigue considerándose superior al nivel recomendado y la proporción de sólidos volátiles con respecto a la de los sólidos totales es también buena. El valor del pH se encuentra por debajo del rango óptimo lo que podría provocar el aumento de la presencia de ácidos volátiles y por tanto la disminución de la producción del gas.
- **M-4 Excretas de cerdo + agua (70-30):** El nivel de alcalinidad también se encuentra entre los rangos aceptables. Al igual que en el análisis anterior la cantidad de sólidos totales sigue considerándose superior al nivel recomendado y la proporción de sólidos volátiles con respecto a la de los sólidos totales es también buena. El valor del pH en este caso se encuentra fuera del rango óptimo y exactamente en el límite inferior del cual no se debería exceder ya que los ácidos volátiles generarán un medio tóxico para las bacterias metanogénicas inhibiendo totalmente el proceso.
- **M-5 Excretas de cerdo + orines + residuos (28.2-11.4-7.9):** El nivel de alcalinidad también se encuentra entre los rangos aceptables. Al igual que en el análisis anterior la cantidad de sólidos totales sigue considerándose superior al nivel recomendado y la proporción de sólidos volátiles con respecto a la de los sólidos totales es también buena. El valor del pH es muy bajo, se encuentra fuera del rango óptimo y muy cercano al límite inferior al que las bacterias pueden trabajar. El pH indica el riesgo que corre la biomasa del digestor ante cualquier cambio negativo del pH.



5.2.2.2 Análisis durante el proceso

Durante el proceso de estudio de esta segunda experiencia y durante la toma de muestras se fueron realizando una serie de análisis para determinar el correcto funcionamiento del proceso y la calidad del producto final obtenido.

Los análisis realizados en cada toma de datos consistieron en la medida del pH de cada uno de los digestores, la temperatura y la inflamabilidad del gas resultante. Mediante estos análisis rutinarios se pudo comprobar a diario que el proceso seguía dentro de los parámetros adecuados. Además el estudio de inflamabilidad del gas nos dio una idea de cuando el gas empezaba a tener un considerable contenido en metano (CH_4).

Una vez este estudio de inflamabilidad del gas empezó a resultar satisfactorio se procedió a realizar un estudio por cromatografía del gas resultante (biogás).

Los resultados obtenidos de las pruebas diarias se recogen en el Anexo E (Datos segunda experiencia). Los resultados del análisis de cromatografía se encuentran en el Anexo G (Análisis durante el proceso (Cromatografía)).

5.2.2.3. Análisis finales

Una vez finalizada la experiencia se llevaron a cabo una serie de análisis con la finalidad de sacar conclusiones sobre la realización de la misma. Estos análisis consistieron en el estudio del contenido final del digestor con la finalidad básica de comprobar la eliminación de SV producida en cada uno de los digestores y poderla comparar con el biogás producido.

Los resultados obtenidos en estos análisis se muestran en el Anexo H (Análisis finales de la segunda experiencia).



En la Tabla 5.5 se presenta un resumen de la producción y los ratios elegidos para proceder a un correcto análisis de los resultados obtenidos.

Tabla 5.5. Resumen segunda experiencia

	Biogás producido (ml)	ml Bg / g SValimentados (ml Bg/ g SValim.)	ml Bg / ml útil digestor (ml Bg/ ml Dig.)
Digestor 1	287.416	56,027	2,274
Digestor 2	206.163	55,420	1,631
Digestor 3	209.163	30,313	1,655

5.2.3 Resultados

Una vez finalizado el período destinado a la recogida de datos para esta segunda experiencia se obtuvieron los resultados recogidos en la Tabla 5.6.

Tabla 5.6. Producciones gas segunda experiencia

Digestor	Características	Días Exp.	Gas producido (l)
Digestor 1	Con Residuos de mercado	79	287,416
Digestor 2	Muy diluido con agua	79	206,386
Digestor 3	Poco diluido con agua	79	209,163

Con los datos tomados en esta segunda experiencia se han realizado gráficos, en los que se presentan la temperatura diaria, la producción diaria de gas y la producción acumulada (Figuras 5.15, 5.17. y 5.19) . Además se han realizado gráficos en los que se presenta la



producción diaria y acumulada en función de los sólidos volátiles introducidos en el digestor. (Figuras 5.16, 5.18 y 5.20) Estos gráficos tienen un especial interés, ya que la comparativa entre digestores resulta más fiable al eliminar un factor diferencial: la mayor o menor cantidad de alimento (para bacterias metanogénicas) introducido en el digestor.

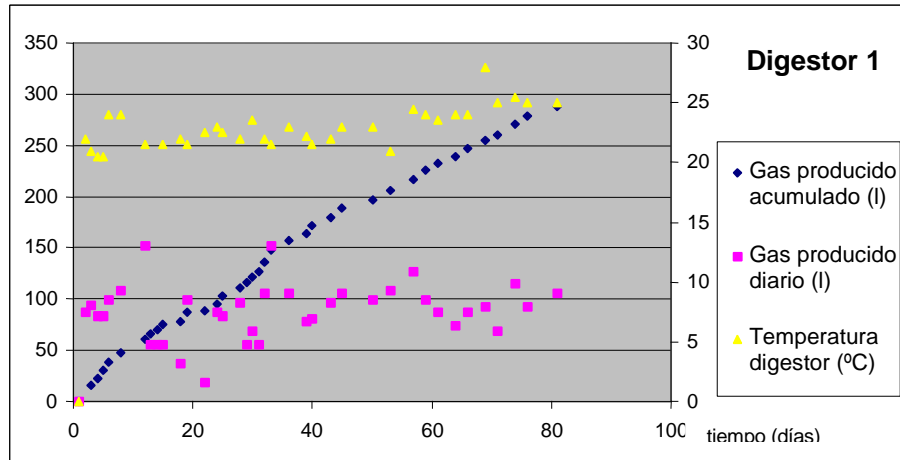


Figura 5.15. Producción primer digestor

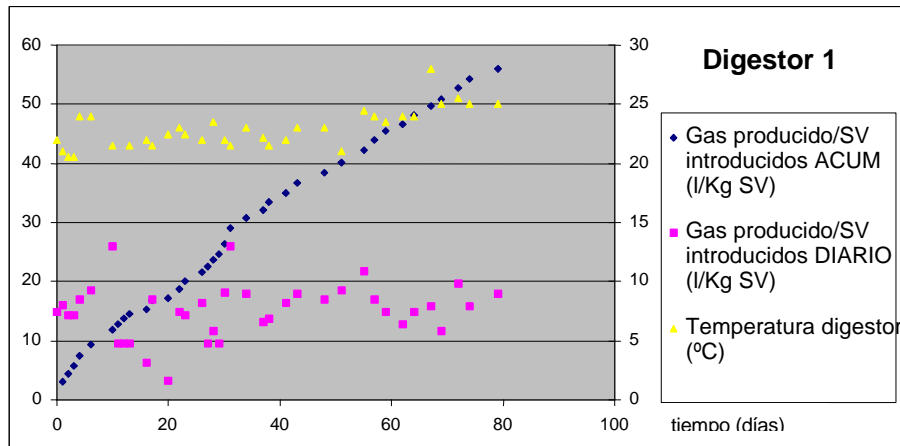


Figura 5.16. Producción primer digestor en función SV



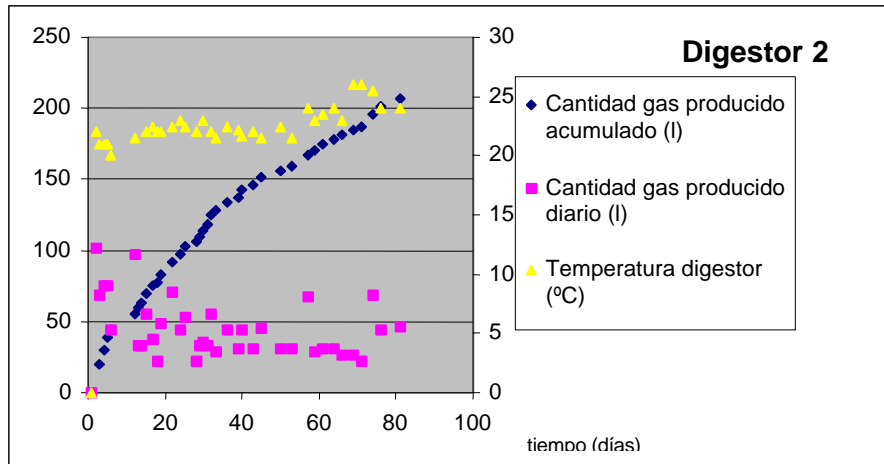


Figura 5.17. Producción segundo digestor

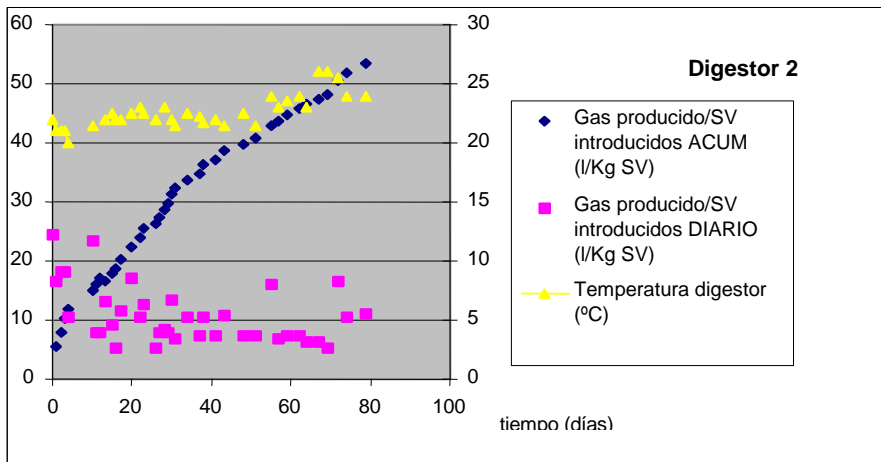


Figura 5.18. Producción segundo digestor en función SV



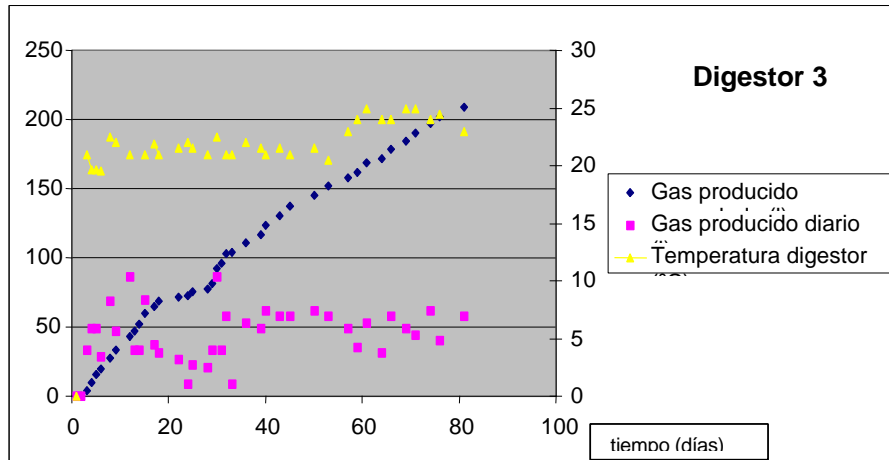


Figura 5.19. Producción tercer digestor

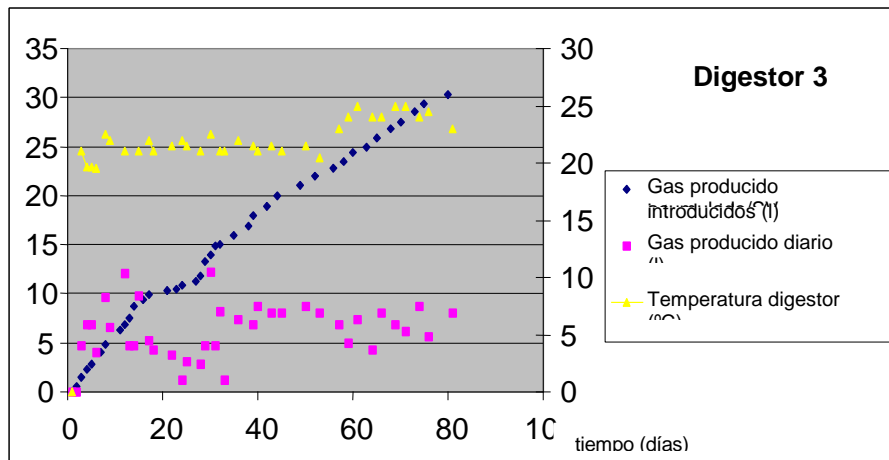


Figura 5.20. Producción tercer digestor en función SV



En el gráfico de la Figura 5.21 se presentan comparativas entre los tres digestores. Cada uno de ellos fue inoculado con las mismas cantidades y sustancias, variando en cada uno de ellos el “alimento” introducido. El gráfico nos da una idea de la producción de biogás según el alimento introducido. Para cada uno de de los digestores se realizaron idénticas tomas de muestras y de datos y estuvieron sometidos a idénticas condiciones externas.

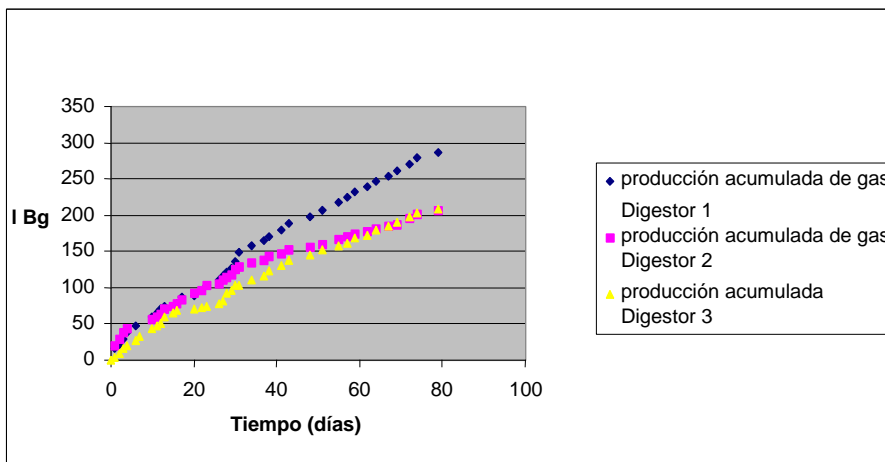


Figura 5.21. Comparación producciones acumuladas

La comparación entre producciones de biogás en biodigestores que han sido alimentados de distinta manera resulta más fiable cuando se realiza eliminando el factor diferencial de los SV introducidos. En la Figura 5.22 se presentan las producciones acumuladas de cada uno de los digestores en función de los SV introducidos.

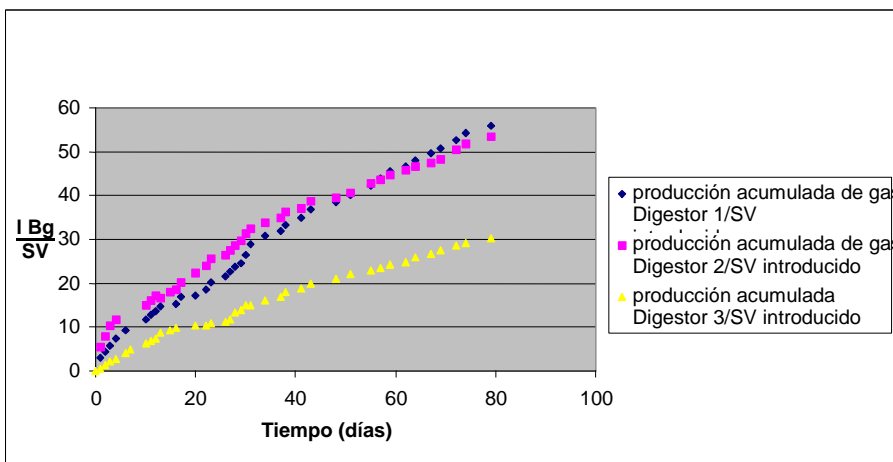


Figura 5.22. Producciones acumuladas en función SV



5.2.3.1. Análisis resultados segunda experiencia

En esta segunda experiencia se ha decidido tener en cuenta únicamente tres parámetros para el estudio de rendimiento de los digestores con las diferentes composiciones introducidas a modo de alimento. Estos tres parámetros han sido **biogás total producido**, **biogás producido en función de los sólidos volátiles alimentados** y **biogás producido en función de los litros de digestor rellenados al inicio de la experiencia**. Se pretendían tener en cuenta de cara al estudio de los resultados otros ratios como la **eliminación de sólidos volátiles (g)** y **biogás producido en función de los sólidos volátiles eliminados**.

$$\text{Eliminación de SV [g]} = \text{SV}_i - \text{SV}_f$$

$$\text{Biogás producido / SV eliminado [ml Bg / g SVelim.]} = \frac{\text{BiogásTOTAL(ml)}}{\text{SVelimados(g)}}$$

Finalmente estos dos ratios, que podían dar una importante información de cara al estudio, han sido desestimados ya que la información que nos daban en el caso concreto de nuestra experiencia podía ser engañosa e incluso errónea. Con estos parámetros se consigue visualizar por un lado la cantidad de materia orgánica transformada con el proceso (uno de los objetivos fundamentales del mismo) y por otro que cantidad de gas se produce en función de la materia orgánica que se elimina. Estos parámetros son importantes de cara a realizar comparaciones entre digestores alimentados de diferente manera, pero en nuestro caso no se han introducido en el estudio ya que los sólidos volátiles finales han resultado ser superiores a los sólidos volátiles iniciales. Esto muestra que se han debido producir irregularidades ya sea en el muestreo (muestra no representativa) o en la analítica.

Resulta complicado conseguir una mezcla representativa homogénea cuando se está trabajando con palas y cubos sin ningún tipo de precisión. Además no se han podido repetir los análisis (para minimizar los efectos de las anomalías en las muestras) ya que la



realización de los análisis resulta costosa económicamente y no se disponía de el capital necesario.

Observando los análisis realizados y los ratios calculados se pueden sacar las siguientes hipótesis:

- El tanto por ciento dentro de la producción de Bg de nuestros digestores ha resultado ser considerablemente bajo para esta segunda experiencia. Se han barajado diferentes respuestas para este problema: **1)** El tiempo de adaptación y realización de la experiencia no ha sido el necesario, dado que el inóculo introducido no era un buen inóculo, con la presencia de bacterias metanogénicas necesarias. El tiempo de adaptación que se le dio a este inóculo fue insuficiente. **2)** Se produjo durante el proceso de digestión una inhibición debida al excedente de SV iniciales en el digestor. Esta inhibición se produjo a consecuencia de la proliferación de *amoníaco gas* en el digestor.

- No se ha conseguido una producción de gas mayor en aquellos digestores que fueron alimentados con mayor cantidad de SV. Este hecho también puede ser debido a 2 factores: **1)** La existencia de una fase limitante, de manera que los microorganismos no puedan digerir una mayor cantidad de M.O. en una misma cantidad de tiempo y que, por lo tanto, todos los digestores trabajen al mismo ritmo de producción de Bg. Si esto sucede realmente, los digestores con mayor presencia de SV iniciales seguirán produciendo Bg durante mucho más tiempo, mientras que los que posean menor cantidad de SV en su alimentación iniciaran antes el descenso en su curva de producción de Bg. **2)** Se puede deber igualmente a un proceso de inhibición dentro de los digestores alimentados con mayor cantidad de SV, ya que esta mayor cantidad podría saturar el proceso y provocar la proliferación de *amoníaco gas*, que actuase de inhibidor del proceso.

- Se observa igualmente que, pese a existir diferencias significativas en la cantidad de SV alimentados en cada uno de los digestores la producción total de Bg producido por cada uno de ellos es muy similar. Este hecho se ve claramente reflejado en el ratio de producción de Bg en función de los SV iniciales, donde el Biodigestor 3 da un valor más bajo del ratio por ser el que ha sido alimentado con mayor cantidad de SV dando cantidades de Bg muy similares a los demás.



5.2.4 Conclusiones

De la experimentación y el análisis de los resultados obtenidos para esta experiencia 2 podemos sacar las siguientes conclusiones:

- La construcción de un invernadero favorece al proceso de DA, ya que estabiliza la temperatura del reactor.

- Si aumentamos la concentración de SV en la alimentación de los digestores, el tiempo necesario para que finalice la producción de Bg se verá aumentado en consecuencia.

- El ritmo diario de producción de Bg es independiente (en el contexto estudiado) de la cantidad de SV introducidos en la alimentación.

- La poca precisión con la que se realizaron los muestreos (y posiblemente también los análisis) induce a errores en los resultados obtenidos.

- Esta falta de precisión en el contexto de Ventanilla nos impulsa a desestimar en un futuro la realización de análisis costosos (de precisión), pues los resultados carecen de fiabilidad y la inversión es elevada.

- El agua es un buen diluyente para los procesos de DA en el contexto del Parque Porcino de Ventanilla y para la digestión de purines de cerdo.

- Pese a ser el agua un buen diluyente, que ha dado unos aceptables valores en la producción de Bg, se precisa la realización de nuevas experiencias que estudien la viabilidad de sustituir dicho elemento por otro más fácil de encontrar en el contexto del Parque Porcino y que tenga un menor coste. En el caso del orín de los mismos cerdos, de ser utilizado, ayudaría a eliminar a su vez otro de los problemas para el subsuelo del Parque Porcino.

- Se decide continuar la experimentación con la Experiencia 3, utilizando orín de cerdo como diluyente en lugar de agua.



5.3 Tercera experiencia (orín como diluyente)

5.3.1 Introducción y objetivos

Esta experiencia nace con la finalidad de probar las mismas concentraciones del sustrato de la segunda experiencia pero reemplazando un elemento: el agua.

Para la tercera experiencia se considera importante utilizar en vez de agua, el orine de los mismos cerdos para ser mezclado con las excretas y formar un sustrato menos denso. El orine se considera propicio para esta función debido a que son líquidos residuales generados por la crianza de cerdos, cuya utilización en la generación de biogás vendría a ser propicia considerando que no se cuenta con un sistema de tratamiento de estos efluentes.

Para esta experiencia se realizaron también tres pruebas, dos de ellas, como se mencionó anteriormente, repitiendo las mezclas que tuvieron dos de los digestores (los cuales en el análisis de gas resultaron tener una concentración de metano en un 22% y 21% respectivamente). La prueba del tercer digestor consiste en un **reactor control** en el cual se ha introducido solo el inóculo utilizado para los otros dos digestores, sin añadirle purín u orines frescos. Esto con el objetivo de ver el efecto de degradación del inóculo, por ello el nombre de reactor control. Con el reactor control se pretende lograr unos datos de producción de biogás lo más ajustados posible.



5.3.2 Metodología

Los componentes y concentraciones de cada uno de los digestores se encuentran recogidos en la Tabla 5.7.

Tabla 5.7. Composición tercera experiencia

Ubicación	Biodigestor	Componentes		Volumen (litros)	Porcentaje (%)
Dentro del invernadero	1	Inoculo	Biomasa extraída del digestor N°2	41.63	50
			Biomasa extraída del digestor N°3	41.63	50
	2	Inoculo	Biomasa propia del digestor N°2	41.63	29.05
			Biomasa extraída del digestor N°3	41.63	29.05
		Mezcla	Purín de cerdo	18	12.56
			Orines de cerdo	42	29.32
	3	Inoculo	Biomasa extraída del digestor N°2	41.63	29.05
			Biomasa propia del digestor N°3	41.63	29.05
		Mezcla	Purín de cerdo	36	25.13
			Orines de cerdo	24	16.75



La construcción de los digestores y demás sistemas que participan en la experiencia, no se encuentra detallada pues no se ha construido nada nuevo para esta experiencia, simplemente se ha utilizado todo lo ya construido en el caso de la experiencia 2, variando el contenido de los digestores.

Análisis previos a la tercera experiencia

Al inicio de la experiencia el 27 de diciembre del 2006 se recolectaron las muestras de los componentes de los tres digestores.

- **Muestra N°1 (M-4):** Mezcla de la biomasa extraída del digestor N°2 y N°3 (50% proveniente digestor N°2 y 50 % del digestor N°3)
- **Muestra N°2 (M-5):** Mezcla de la biomasa introducida en el digestor N°2.
- **Muestra N°3 (M-6):** Mezcla de la biomasa introducida en el digestor N°3.

El Laboratorio de Análisis de Agua, Suelo y Medio Ambiente, de la Facultad de Ingeniería Agrícola de la Universidad Nacional Agraria La Molina entregó los siguientes resultados (Anexo J) el 03 de Enero:

Al respecto se nos informó que no resultaba posible realizar las pruebas de alcalinidad debido a la turbiedad y densidad de las muestras, por lo que los resultados no serían confiables. Los resultados de los análisis realizados se encuentran en la Tabla 5.8.

Tabla 5.8. Resultados análisis previos

N° Campo	Sólidos Totales (gr/L)	Sólidos Volátiles (gr/L)	pH
M-4	73.20	39.20	6.40
M-5	88.80	59.60	6.68
M-6	216.33	152.33	6.60



Con estos resultados se puede calcular los valores para cada digestor recogidos en la Tabla 5.9.

Tabla 5.9. Composición de los digestores

Digestores	Sólidos Totales		Sólidos Volátiles		pH
	Kg	%	Kg	%	
1	10.48	7.32	5.62	3.9	6.40
2	30.99	21.77	21.82	15.23	6.60
3	12.72	8.88	8.54	5,96	6.68

- Sólidos Totales

La cantidad de sólidos totales adecuados para el proceso de digestión anaerobia se considera que depende del tipo de digestor, sin embargo el rango óptimo se encuentra entre el 10% y el 40%.

Para los digestores N°1 y N°3 el porcentaje de ST se encuentra debajo del establecido como rango óptimo, sin embargo considerando que el modelo de digestor empleado (tipo batch) no cuenta con un sistema de agitación, este podría ser un factor favorable para mejorar la producción de biogás. El digestor N°2 si se encuentra dentro del rango óptimo con una concentración de 21.77%.

- Sólidos Volátiles

Se refiere a la parte de sólidos totales que se volatilizan durante la reducción de toda la materia orgánica. En principio puede considerarse que los sólidos volátiles corresponden a todos los compuestos orgánicos que pueden convertirse en metano.

La relación SV/ST debe oscilar entre 0.18-0.40 gSV / gST. [25] En el caso del sustrato utilizado en los digestores, los tres exceden esta relación. El digestor N°1 tiene una relación de 0.54 g SV/g ST, el digestor N°2 de 0.70 g SV/g ST y el digestor N°3 de 0.54 g



SV/g ST, aunque exceden el valor de la relación óptima, el excedente no es muy alto aunque es importante tomarlo en cuenta ya que se podría convertir en un factor de saturación en el proceso de biodigestión.

- pH

Representa la acidez o basicidad del medio. El rango óptimo se encuentra en 6.6 y 7.6. [19]

En los resultados de los análisis para la 3era experiencia el valor de pH en los 3 digestores se encuentra o en el borde inferior o por debajo del rango óptimo.

En el caso de que el sustrato no presente capacidad tampón, que es la facultad del compuesto de mantener constante el pH (*Hernán Ulrico Socio; Club Rosarino de Acuafilia*) El proceso de digestión se verá afectado con la inhibición del proceso biológico y presencia de ácidos volátiles lo que a su vez provocaría disminución en la producción de gas y la reducción rápida del pH. [19]

Análisis durante la tercera experiencia

Durante el proceso de estudio de esta tercera experiencia y durante la toma de muestras se fueron realizando una serie de análisis para determinar el correcto funcionamiento del proceso y la calidad del producto final obtenido.

Los análisis realizados en cada toma de datos consistieron en la medida del pH de cada uno de los digestores, la temperatura y la inflamabilidad del gas resultante. Mediante estos análisis rutinarios se pudo comprobar a diario que el proceso seguía dentro de los parámetros adecuados. Además el estudio de inflamabilidad del gas nos dio una idea de cuando el gas empezaba a tener un considerable contenido en metano (CH₄). Esto se produjo a partir del 2 de febrero del 2007.

Una vez este estudio de inflamabilidad del gas empezó a resultar satisfactorio se procedió a realizar un estudio por cromatografía del gas resultante (biogás).

Los resultados obtenidos de las pruebas diarias se recogen en el Anexo I (Datos tercera experiencia). Los resultados del análisis de cromatografía se encuentran en el Anexo K (Análisis durante el proceso (Cromatografía)).



Análisis finales

No se ha considerado relevante realizar dichos análisis después de los resultados obtenidos en la experiencia 2, ya que pese a ser una herramienta útil para analizar los resultados obtenidos, en el contexto de Ventanilla la precisión es escasa y por lo tanto la fiabilidad de estos análisis también.

5.3.3 Resultados tercera experiencia

Los datos que se fueron recopilando mientras la experiencia 3 tenía lugar se encuentran recopilados en el Anexo I. En este anexo se recoge la evolución diaria de cada uno de los digestores, atendiendo a las variables ya mencionadas en el caso de la experiencia 2. El cuadro resumen de las producciones de gas en esta nueva prueba (Tabla 5.10) muestra la producción total de Bg y los días de experimentación.

Tabla 5.10. Producciones gas tercera experiencia

Digestor	Características	Días Exp.	Gas producido (l)
Digestor 1	Digestor control	63	206,531
Digestor 2	Purín + orín (+diluido)	63	197,505
Digestor 3	Purín + orín (+ concentrado)	63	186,356

Para proceder a un correcto análisis de esta experiencia, a parte de la producción total de gas se han tenido en cuenta los mismos ratios seleccionados en el caso de la experiencia 2. (Tabla 5.11)



Tabla 5.11. Tabla resumen tercera experiencia

Digestor	Producción Total Bg (ml)	ml Bg / g SValimentados (ml Bg/ g SValim.)	ml Bg / ml útil digestor (ml Bg/ ml Dig.)	% CH ₄ en Bg.
D1	206,531	-	-	48,73
D2	197,505	55,23	1,379	37,50
D3	186,356	20,389	1,301	42,69

5.3.3.1 Análisis resultados tercera experiencia

Para el análisis de los resultados en esta tercera experiencia se tomaron la mismas decisiones que en el caso de la experiencia 2. Los ratios seleccionados son los mismos, aunque en este caso los motivos resultan distintos. En la experiencia 3 se ha considerado poco relevante el hecho de no realizar los análisis finales, pues en el caso de la experiencia 2 resultaron ser poco satisfactorios, debido principalmente a errores en la toma de muestra que, con toda seguridad, se podrían repetir en la presente experiencia. En consecuencia los ratios de estudio resultan ser los mismos.

Además se observa en a tabla resumen (Tabla 5.11) que el **bidón 1** no tiene resultado de los ratios escogidos. Esto es debido a que, como se menciona en el montaje de de la experiencia, este bidón es un digestor de control. En este digestor únicamente hay presencia de inóculo, exactamente en las mismas cantidades que en el resto de digestores. Por lo tanto no ha sido alimentado, de manera que el cálculo de ratios carece de sentido.

El objetivo del mencionado **bidón 1** era el de realizar una experimentación dando toda la importancia en la producción de Bg al producto introducido como alimentación del digestor y eliminando así cualquier tipo de producción debida al inóculo, es decir, tener en cuenta el Bg producido debido a la respiración endógena de los microorganismos y restárselo al Bg que de debe a la degradación del sustrato. Esto se quería lograr restando la producción de gas obtenida en **el digestor control** (1) a la producción obtenida en los digestores 2 y 3. El



objetivo finalmente no se ha podido cumplir, dado que el digestor control (1) ha tenido una producción muy similar al resto de digestores. Esta anomalía en el funcionamiento esperado para el digestor control ha podido ser causada por diferentes motivos:

1) No toda la MO se había consumido cuando se dio por finalizada la exp. 2. Esto quiere decir que la producción de Bg no había finalizado y además no se dispuso del mejor inóculo para realizar la experiencia 3. El inóculo debe ser el motor del proceso de digestión, de manera que estemos añadiendo al digestor la presencia de microorganismos que se encarguen de realizar todos los procesos necesarios, y todo esto restando el tiempo de adaptación necesario para que aparezcan por si solos, ya que los añadimos de antemano. Pero este inóculo debe ser únicamente esta colonia bacteriana, minimizando la presencia de M.O. de manera que se pueda proceder a un correcto estudio del proceso de digestión.

2) Puede que dentro del digestor control las comunidades microbianas hayan entrado en **fase endógena**, de manera que la falta de alimento provoque la muerte de microorganismos. Éstos, después de la rotura de su membrana celular, servirán de alimento para los microorganismos que aún siguen vivos. De esta manera la digestión de las células que comienzan a morir por falta de alimento mantendría la producción de Bg durante un cierto tiempo.

Pese a todo parece que el resultado del funcionamiento inesperado del digestor control resulta una combinación de las dos posibilidades mencionadas. a primera posibilidad, la presencia de gran cantidad de M.O. en el inóculo para la experiencia 3 parece clara si se analizan los resultados obtenidos en los análisis finales de la experiencia 2: la presencia de SV finales resultó ser muy importante en lo que serviría de inóculo para la exp. 3. La **curva de producción acumulada** de Bg no inició su descenso en la exp. 2 (Figura 4.4.2.3.2.), esto constata que el tiempo utilizado en la experiencia 2 no fue el suficiente, no permitiendo así el consumo de toda la M.O. presente.

Se debe tener presente en este estudio que a **temperatura ambiente** los procesos de digestión anaerobia (D.A.) son mucho más lentos. Estos procesos están afectados por multitud de variables que se ven afectadas por la fluctuación en las temperaturas registradas (pese a la construcción del invernadero). En la práctica esto supone que el descenso en la producción de Bg que debían experimentar en los últimos días los digestores (Fig. 5.23), no llegó a producirse (Fig 5.15).



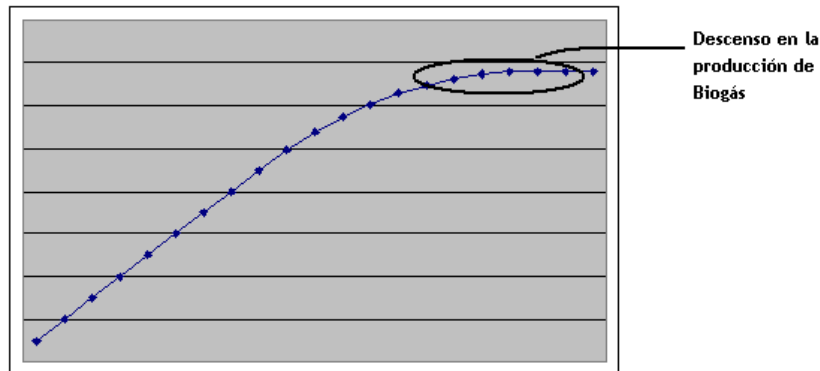


Figura 5.23. Ejemplo caso ideal final experimentación

Pese a ello, y a diferencia de la experiencia 2 en la que el % de metano fue notablemente bajo, en esta experiencia los resultados de los análisis han mostrado una considerable presencia de CH_4 . El tiempo de adaptación y la mejora del inóculo introducido han afectado considerablemente en este factor. El % de metano producido ha sido considerablemente mayor en el digestor control, situación que ayuda a reforzar la teoría de la falta de tiempo en las dos experimentaciones realizadas, de manera que el digestor con un inóculo más adaptado ha producido más y mejor Bg. En la Imagen 5.2. se muestran las tres muestras de Bg de los tres diferentes digestores quemando. Las diferencias son evidentes y ratifican las diferencias en la concentración de CH_4 . Además se pueden observar otras fotografías de la utilización final del Bg (anexo L).



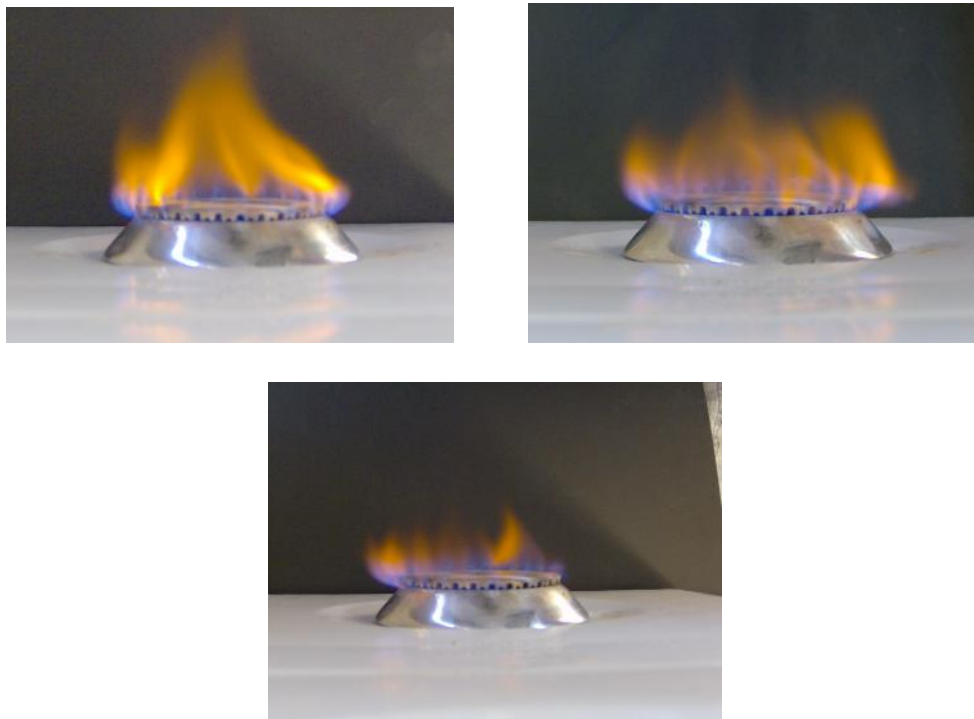


Imagen 5.2. Gas quemando Digestores 1,2 y 3 (de Izq. a Dcha.)

En esta experiencia se ha repetido uno de los funcionamientos inesperados detectados en la exp. 2: han producido Bg al mismo nivel los tres digestores, independientemente de la alimentación de SV introducida en cada uno de ellos. Los digestores en los que la presencia inicial de SV era mucho más alto que lo recomendado por los expertos en el proceso han acabado produciendo Bg, eso si, al mismo ritmo que los otros digestores (con menor presencia de SV). Las posibles causas de esta situación pueden ser: 1) Fase limitante en el proceso de metanogénesis o 2) Inhibición del proceso provocada por la proliferación de **amoníaco gas** (debido al exceso de SV).

En cualquiera de los dos casos, el resultado seguiría siendo el mismo: los digestores con mayor presencia de SV producirán Bg durante un periodo más largo que los otros. En consecuencia se ha considerado que el tiempo que se ha utilizado para realizar la exp. 2 (la exp. 3 continúa funcionando) ha sido insuficiente. Motivo por el cual el inóculo no estaba suficientemente adaptado para realizar una exp. 3 con el debido rigor científico. Pese a ello, el paso del tiempo y la repetición de los experimentos pueden dar resultados mucho más fiables de cara al rendimiento real de los digestores al igual que a la utilización de la totalidad de los ratios seleccionados.



5.3.4 Conclusiones

De la realización de esta experiencia 3 y del posterior análisis de los resultados obtenidos se han podido obtener una serie de conclusiones:

- La colocación de los digestores en un invernadero favorece el proceso de DA, evitando las bruscas variaciones de temperatura que puedan afectar al proceso.
- El tiempo necesario para que finalice la producción de Bg se ve considerablemente aumentado en las condiciones que encontramos en el contexto de Ventanilla.
- Aumentar la cantidad de SV introducidos en la alimentación del digestor no implica una mayor producción de Bg en el mismo tiempo, sino que el ritmo de producción se mantiene siendo más largo el proceso. (contexto de Ventanilla)
- Es fundamental introducir un inóculo perteneciente a una experiencia cuyo proceso de producción de Bg haya finalizado, en el interior del Digestor Control. Puesto que de lo contrario la MO presente continuará degradando y resultará imposible sacar conclusiones a partir de este digestor.
- Con el Bg producido en esta experiencia (pequeña escala) es posible cocinar a diario o como mínimo dar unos minutos de cocción al agua de consumo humano para evitar la presencia de microorganismos. (Anexo L)
- Con la debida formación y ayuda, habitantes del Parque Porcino de Ventanilla pueden llegar a manipular, mantener y beneficiarse de digestores anaerobios, manipulando el gas con las debidas precauciones y cocinando con él.
- El orín de cerdo es un buen diluyente de la MO para realizar procesos de DA en el contexto de Ventanilla, dado que se ha producido Bg en cantidades aceptables.
- Para poder utilizar el orín como diluyente en el contexto de Ventanilla se debe lograr una optimización en la recogida del mismo (mejora de los sistemas de recogida e impermeabilización de los corrales).



6. Presupuesto

En este apartado se pretende realizar un presupuesto lo más ajustado posible de la realización de dicho proyecto. Esta valoración se ha detallado en tres grandes partidas:

1. Desplazamiento a Perú
2. Construcción y puesta en marcha de los digestores
3. Oficina técnica (confección del proyecto escrito)

Los gastos realizados en Perú se han puesto en la moneda local (Soles) y su conversión al Euro. En las fechas en las que se realizaron los gastos la cotización era aproximadamente

4,022 S/. = 1 €

Desplazamiento a Perú

Se han desglosado los gastos realizados hasta la llegada a Perú en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1: Costes desplazamiento Perú

Concepto	Precio (€)
Antes desplazamiento (visitas...)	146,5
Billete avión	1.560,3
Material cursos	30,7
TOTAL	1.737,5



Costes construcción y puesta en marcha de los digestores.

Se han desglosado todos los gastos realizados durante la estada en Perú en la que se construyó los digestores y se pusieron en funcionamiento en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2: Costes construcción y puesta en marcha digestores

CONCEPTO	Coste (S/.)	Coste (€)
Adquisición de materiales para la construcción de los biodigestores	1700,0	422,68
Transporte de materiales	50,0	12,43
Transporte de insumos para utilizarse como inóculo para el sustrato	100,0	24,86
Adquisición de materiales para el mantenimiento y monitoreo de los biodigestores	250,0	62,16
Análisis Químicos	871,5	216,68
Análisis Cromatográficos para metano	1785,0	443,81
Transporte de muestras para análisis	180,0	44,75
Gastos de transporte público para construcción y monitoreo de los biodigestores	1050,0	261,06
Varios (manutención...)	1208,61	300,50
TOTAL (S/.) // TOTAL (€)	7195,11	1.788,94

Los costes de los **análisis**, que ya están contabilizados en el cuadro anterior están recopilados en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3: Costes analíticas realizadas

Análisis	Unidad	Costo (c/u)	Total (S/.)	Total (€)
DQO	3	S/. 49,00	147	36,55
Sólidos Totales	14	S/. 17,50	245	60,91
Sólidos Volátiles	14	S/. 17,50	245	60,91
pH	14	S/. 10,50	147	36,55
Cromatografía para metano	6	S/. 297,50	1.785	443,81
Alcalinidad	5	S/. 17,50	87,5	21,76



Costes oficina técnica

En la Tabla 5.4 se contabilizan los gastos de ingeniería derivados de la confección del documento escrito al igual que las horas del ingeniero júnior desplazado para la realización del proyecto. Las horas del **ingeniero júnior** se han contabilizado a **35 €/hora** y las **horas de ingeniería a 40 €/hora**.

Concepto	Horas	Precio (€/h)	Total (€)
Redacción del documento técnico y búsqueda de la información necesaria	100	40	4.000
Trabajos realizados por Ingeniero Júnior en Perú	200	35	7.000
Total Oficina Técnica			11.000

Taula 5.4: Costes oficina técnica

Coste final del proyecto

Para calcular el coste final del proyecto se han tenido en cuenta la suma de las tres partidas mencionadas. En este coste total no se han tenido en cuenta ni beneficios ni impuestos. Podemos observar el coste final en la tabla 5.5.

Concepto	Total (€)
Costes construcción y puesta en marcha digestores	1.788,94
Coste desplazamiento a Perú	1.737,5
Coste Oficina técnica	11.000
Total Realización Proyecto	14.526,4

Taula 5.5: Coste Total del Proyecto





7. Impacto Ambiental

Los residuos orgánicos provocan la proliferación de larvas, bacterias y mosquitos, que aumentan las enfermedades como la fiebre tifoidea, la malaria o el dengue. La materia orgánica que fermenta de forma descontrolada a la intemperie puede llegar a contaminar acuíferos a partir de la percolación a través de los terrenos de los lixiviados, pudiendo contaminar las aguas de las que se abastecen las comunidades.

La necesidad de fertilizantes químicos para rentabilizar las plantaciones, implica en muchos casos unos costos muy altos a los agricultores. Los fertilizantes químicos además no son fabricados en Perú, sino que son transportados de otros países, lo que implica unas dependencias exteriores del país que no favorecen el desarrollo económico.

La energía es también una demanda constante. La mayor cantidad de la energía eléctrica del Perú proviene de fuentes renovables, como la hidráulica. El gas es consumido en bombonas importadas del exterior, situación que provoca una nueva dependencia económica del exterior. Actualmente, con la llegada del gas de Camisea mediante el gaseoducto de reciente construcción hasta Lima, esta dependencia energética puede disminuir, pero esta es una de las pocas energías fósiles que extrae el país.

La digestión anaerobia se presenta como una alternativa de tratamiento que puede comportar tres beneficios ambientales significativos:

- Evita la contaminación del medio hídrico i del suelo por fermentación incontrolada de la materia orgánica, mejorando las condiciones ambientales e higiénicas de la zona.
- Se obtiene fertilizante orgánico de alta calidad que puede ser usado para aumentar el rendimiento de las plantaciones.
- Se obtiene una fuente de energía renovable, el biogás, que podría suponer la independencia energética del usuario.

Se debe destacar que estas grandes propiedades de la digestión anaerobia se consiguen después de un esfuerzo de planificación en la fase de diseño y de una implicación del usuario o explotador de la planta. Si alguno de estos factores falla, el sistema de digestión anaerobia ya no funcionará correctamente y será un fracaso, pudiendo en esa situación



provocar un impacto ambiental muy significativo. Por ejemplo, una fuga de gas metano implica un efecto invernadero 20 veces superior que el mismo volumen de carbono.

Una planta de biogás que valoriza el metano producido, produce el ahorro de emisiones de gases contaminantes por dos vías:

1. Se evita emisiones de metano (CH_4) a la atmósfera.
2. Se produce energía eléctrica y energía térmica que sustituyen a las producidas por fuentes fósiles.

Actualmente se desconoce si se podrá comerciar con actuaciones que eviten la emisión de gases a la atmósfera.

A modo de ejemplo, se muestran a continuación los cálculos realizados para una granja porcina:

Bases:

- Granja porcina de ciclo cerrado, 10.500 m³/año de purín.
- El metano contribuye 21 veces más al efecto invernadero que el CO₂. Actualmente sus emisiones representan del 13 % del efecto invernadero, de éstas el 17,9 % proviene de las deyecciones ganaderas.
- Se considera que de forma natural el purín en las balsas libera el 30 % del metano que es capaz de producir.
- La densidad del metano es de 0,6 gr/litro.
- A falta de concretar las reglas del comercio, el precio de la tonelada de CO₂ equivalente se considera entre 15 y 30 €.



1. Respeto a evitar emisiones de metano a la atmósfera

En la granja, las balsas de purines de forma natural producen unos 73.800 m³ de biogás con un 60 % de metano. Estas emisiones a la atmósfera corresponden a 929.880 m³ de CO₂, que equivalen a **557,93 toneladas**.

A un precio supuesto de 15 € por tonelada, la granja ingresaría: **8.369 €/año**

2. Respeto a la venta de energía eléctrica

1 kWh producido con fuel-oil equivale a la emisión de 0,75 kg de CO₂ a la atmósfera.

Por lo tanto si se producen 1.192.000 kWh/año (realizando los pertinentes factores de conversión), y se vende el 85 % a la red, se podrían comercializar los derechos de **760 Toneladas de CO₂ equivalentes**, no producidas con fuel.

En el caso de vender estos derechos a 15 €/tonelada, se tendría un ingreso de **11.400 €**

Estos datos son aproximados y de difícil aplicación a la situación actual de Perú, pues no se dispone ni tan sólo de balsas donde acumular este purín. De todos modos los resultados obtenidos ejemplifican los beneficios que se pueden obtener con la implantación de la tecnología de Digestión Anaerobia.





Conclusiones

La digestión anaerobia resulta útil para tratar los excrementos generados en el Parque Porcino de Ventanilla, consiguiendo una materia más fácilmente asimilable por el suelo y un gas utilizable a modo de combustible.

Es posible realizar un proceso de DA a pequeña escala con la mínima utilización de agua, optimizando la recogida del orín y utilizando éste para diluir la mezcla.

Es posible producir a pequeña escala y en condiciones adversas Bg, logrando un considerable porcentaje de metano en el gas final.

El estudio de viabilidad realizado ha sido considerado de cara a la toma de decisiones en el proyecto iniciado por Ciudad Saludable en Ventanilla.

La construcción de un invernadero favorece la producción de Bg, ya que minimiza los efectos de la brusquedad en los cambios climáticos.

A temperatura ambiente y sin agitación el tiempo necesario para llegar a la finalización del proceso de digestión (final en la producción de Bg) es considerablemente superior que el tiempo necesario en condiciones más favorables.

A temperatura ambiente y sin agitación la producción de Bg se mantiene aproximadamente estable, independientemente de los SV introducidos como alimentación.

Se ha logrado construir una planta de Bg a pequeña escala, llegando a ser gestionada por los propios granjeros del Parque Porcino y futuros beneficiarios.

Se ha acercado la tecnología de Digestión Anaerobia a sectores desfavorecidos de la sociedad peruana, y éstos la han aceptado, asimilado y se han sabido beneficiar de ella.



Agradecimientos

A Ivet Ferrer, por enseñarme todos los misterios de la Digestión Anaerobia.

A Mabel Almeida, por acompañarme, ayudarme y compartir esta linda experiencia conmigo.

A la Familia Almeida, por acogerme y acercarme a lo más arraigado de la cultura peruana.

A la Familia Iparraguirre, simplemente por enseñarme cuan rica puede ser la gente que no dispone de medios económicos.

A Cesar Iparraguirre, que nunca tubo un no por respuesta.

A Ciudad Saludable, por el apoyo prestado.

A Albina Ruiz, por abrirme las puertas de “la sucursal del cielo”.

A Rosario Pastor, por ser quien me ayudó a iniciar este viaje.

A Eduard y Chema Ruestes y Luis Duque, entre otros, por la colaboración prestada.

A Xavier Flotats y Enric Velo por la gran ayuda prestada, en cuanto a información y formación.

Al “Centre de Cooperació pel Desenvolupament de la UPC” por permitirme hacer realidad este proyecto.

A Maria del Mar Mendoza, por estar siempre “al pie del cañón” incluso en los momentos más difíciles.

A familiares y amigos por la paciencia y los ánimos.

A Matías Lingenfelder, por empujarme a acabar lo que empecé, desde algún lugar.



Bibliografía

Referencias bibliográficas

- [1] ESCUELA SUPERIOR DE INGENIEROS TECNUM, CAMPUS TECNOLÓGICO UNIVERSIDAD DE NAVARRA. Libro electrónico ciencias de la tierra y del medio ambiente. Tema 4: Ecosistemas.

[<http://www1.ceit.es/Asignaturas/Ecologia/Hipertexto/04Ecosis/130Ciclos.htm>, Julio de 2006]

- [2] FISICANET

[http://www.fisicanet.com.ar/quimica/q1ap01/apq1_04a.html, Julio de 2006]

- [3] METCALF & EDDY, Inc. *Wastewater Engineering*. Collection Treatment Disposal. McGraw Hill, 1973, p. 260, 313-316, 385-386, 389, 416-418, 591-608, 724-726.

- [4] GERMAN FEDERAL MINISTRY FOR ECONOMIC COOPERATION AND DEVELOPMENT (GTZ). NATURGERECHTE TECHNOLOGIEN, BAU-UND WIRTSCHAFTSBERATUNG (TBW) GmbH : *Anaerobic Processes for the treatment of Municipal and Industrial Wastewater and Waste. An Overview*.

- [5] RAMALHO, R.S. *Introduction to Wastewater Treatment Processes*. Academic Press, Second Edition, 1983.

- [6] FLOTATS et alters. *3er Curs d'Enginyeria Ambiental, Aprofitament Energètic de residus orgànics*. Lleida, 27-29 d'octubre de 1997.



- [7] WERNER, U., STÖHR, U., HEES, N.. *Biogas Plants in Animal Husbandry*. Deutsche Zentrum für Entwicklungstechnologien (GATE), Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH. 1989.
- [8] HENZE et altres. *Wastewater Treatment. Biological and Chemical Processes. Second Edition*. Springer. 1997. p. 285-310.
- [9] FELIPE-MORALES, C..MORENO, U.. *Primer Curso de Biodigestión. 14, 20 y 28 de julio de 2004*. Bioagricultura Casa Blanca (finca de producción, investigación y capacitación en agricultura ecológica y agroecoturismo). Lote 20 – Parcelación Casa Blanca Pachacámac, Lima, Perú.
- [10] MONET, F.. *An Introduction to Anaerobic Digestion of Organic Wastes*. 2003.

[http://www.remade.org.uk/Organics/organics_documents/IntroAnaerobicDigestion.pdf, Julio de 2006]
- [11] INFORMATION AND ADVISORY SERVICE ON APPROPRIATE TECHNOLOGY . GTZ PROJECT . *Biogas Digest. Volume I. Biogas Basics*.

[<http://www5.gtz.de/gate/id/Download.afp?PubName=../publications/BiogasDigestVol1.pdf>, Julio de 2006]
- [12] SASSE,L., KELLNER,C. & KIMARO,A. *Improved Biogas Unit For Developing Countries*. 1991. INFORMATION AND ADVISORY SERVICE ON APPROPRIATE TECHNOLOGY . GTZ PROJECT.

[[http://www5.gtz.de/gate/id/Download.afp?PubName=../publications/G33 IMe.pdf](http://www5.gtz.de/gate/id/Download.afp?PubName=../publications/G33%20IME.pdf), Julio de 2006]



[13] PROCESO VALPUREN O DE SENER/SGT

[<http://www.aecientificos.es/empresas/aecientificos/intereshtml/exretas porcinas/excretas porcinas.htm>, Julio de 2006]

[14] INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL. República del Perú. *Departamento de Lima.*

[<http://www.ignperu.gob.pe/Peru/lima.htm>, Julio de 2006]

[15] OFICINA ESPAÑOLA DEL CAMBIO CLIMÁTICO. *RD 5/2004, de 6 de septiembre, por el que se aprueba el plan nacional de asignación de derechos de emisión, 2005-2007.* Publicado en el Boletín Oficial del Estado (BOE) núm.216 de martes 7 de septiembre de 2004, p. 30096-30111

[<http://www.boe.es/boe/dias/2004-08-28/pdfs/A30096-30111.pdf>, Julio de 2006]

[16] FERNANDEZ BACA, MARCO. *Geografía Del Perú Naturaleza y Hombre, Vol. 8 La Energía.* 1986. Editorial Juan Mejía Baca.

[17] CIUDAD SALUDABLE

[<http://www.ciudadsaludable.org>, Julio de 2006]

[18] ANAEROBIC GRANULAR SLUDGE BED TECHNOLOGY PAGES. Autores: Jim Field, Reyes Sierra.

[<http://www.uasb.org/index.htm>, Julio de 2006]

[19] MATA ALVAREZ, J. *Digestió Anaerobia de Residus Sòlids Urbans.* Estudis i monografies 22, Diputació de Barcelona. 2002.



- [20] GAVALDÁ, O., GUIU, E., *Viabilidad técnico-económica del aprovechamiento energético del biogás producido por codigestión de purines de cerdo. Aplicación a una granja de 5000 cerdos situada en Catalunya.* Proyecto de final de carrera, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Catalunya, Universidad Politécnica de Catalunya. 2000.
- [21] GARCIA, J., RUIZ, A., JUNQUERAS, X., *Depuración de aguas residuales mediante humedales construidos.* Tecnología del agua núm. 165, junio 1997. p. 58-65.
- [22] MARTIN MARTINEZ, I., *Depuración de aguas con plantas emergentes.* MINISTERIO DE AGRICULTURA PESCA Y ALIMENTACIÓN. Madrid, 1989.
- [23] FUNDACIÓN TIERRA *Perspectiva Ambiental 29. El compostaje.*
- [24] GROPELLI, E.S. et altres. *Biodigestor Anaeróbico para el Tratamiento de Residuos Sólidos Orgánicos en Pequeñas Comunidades.* UNL. Santa Fe, Argentina.
- [25] BONMATÍ, A. *Digestió anaeròbia de purins amb altres residus orgànics .* PAGÈS EDITORS
- [26] JARAUTA, L. *Digestión Anaerobia para el tratamiento de residuos orgánicos - El caso de Perú.* PFC Escola Tècnica d'Enginyers Industrials de Barcelona. 2004.

