

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA  
LA MOLINA**

**FACULTAD DE CIENCIAS**



**EVALUACIÓN DE LA TRATABILIDAD DEL EFLUENTE  
GENERADO POR LA PLANTA PILOTO DE LECHE UNALM  
APLICANDO UN REACTOR UASB**

**Presentado por:**

**EDSON JAVIER MORALES CHUQUIMANTARI**

**TESIS PARA OBTAR EL TÍTULO DE  
INGENIERO AMBIENTAL**

**Lima – Perú**

**2014**

## **DEDICATORIA**

Esta Tesis se la dedico a Diós, a mis padres, a mis hermanas, amigos y a todos aquellos que hicieron posible cumplir este gran logro en mi vida, el cual es un primer paso para mi desarrollo profesional, porque aprendí a poner a prueba mi personalidad perseverando hasta conseguir el objetivo, además de hacerle frente a las dificultades y no claudicar en el proceso.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a todas las personas que colaboraron con el desarrollo de este trabajo de investigación, en particular a mi asesora Rosemary Vela y a un gran amigo Edgar Giraldo quienes hicieron posible cumplir este objetivo.

## INDICE

GLOSARIO DE TÉRMINOS .....	9
RESUMEN .....	10
SUMARY .....	11
I. INTRODUCCIÓN .....	12
II. OBJETIVO DE LA INVESTIGACIÓN .....	13
2.1 OBJETIVO GENERAL .....	13
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS: .....	13
III. REVISIÓN DE LITERATURA .....	14
3.1 EFLUENTES INDUSTRIALES LÁCTEOS .....	14
3.2 CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DEL SISTEMA DE DEPURACIÓN .....	16
3.3 ETAPAS DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA .....	16
3.3.1 PROCESO MICROBIOLÓGICO Y BIOQUÍMICO DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA .....	17
3.3.2 DEGRADACIÓN ANAEROBIA DE LA LACTOSA .....	24
3.3.3 POTENCIAL ENERGÉTICO DEL METANO PRODUCIDO POR UN UASB .....	25
3.4 REACTOR ANAEROBIO DE FLUJO ASCENDENTE (UASB) .....	26
3.4.1 ENSAYOS ANAEROBIOS .....	28
3.5 PARAMETROS DE CARACTERIZACION DEL AGUA RESIDUAL .....	30
3.6 NORMA PERUANA .....	33
3.7 PRUEBA ESTADISTICA .....	35
IV. MATERIALES Y METODOS .....	37
4.1 ACTIVIDADES PRODUCTIVAS DE LA PLANTA PILOTO DE LECHE DE LA UNALM .....	38
4.1.1 ELABORACIÓN DE QUESO .....	38
4.1.2 ELABORACIÓN DE YOGURT .....	39
4.1.3 EMBOLSADO DE LECHE .....	39
4.2 CARACTERIZACIÓN DEL EFLUENTE DE LA PLANTA PILOTO DE LECHE .....	39
4.3 DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMAS DE TRATAMIENTO EN LA PLANTA DE LECHE .....	42
4.3.1 DISEÑO DEL REACTOR UASB .....	42
4.3.3 CONEXIONES INTERNAS DE ALIMENTACIÓN .....	46
4.3.4 ALIMENTACIÓN, RECIRCULACION Y MUESTREO DE LODO .....	47
4.3.5 IMPLEMENTACION DEL TANQUE ECUALIZADOR, DE LAS CONEXIONES DEL SISTEMA Y DEL COLECTOR DE GASES .....	48

4.3.6	INSTALACIÓN DE LA ZONA DE DISTRIBUCIÓN DE FLUJO.....	50
4.3.7	MONITOREO DEL AFLUENTE Y EFLUENTE DURANTE EL TIEMPO DE ARRANQUE Y OPERACIÓN DEL REACTOR.....	50
4.4	ELECCIÓN DEL INÓCULO PARA EL REACTOR UASB .....	52
4.5	ARRANQUE DEL REACTOR UASB.....	52
4.6	OPERACIÓN DEL REACTOR UASB.....	53
4.7	INSTRUMENTOS DE COLECTA DE DATOS.....	54
4.7.1	MATERIALES DE MUESTREO INICIAL (CARACTERIZACIÓN).....	54
4.7.2	MATERIALES PARA MUESTREO DIARIO.....	55
4.7.3	MATERIALES PARA ANÁLISIS DE DQO, FÓSFORO TOTAL, ALCALINIDAD, SST Y ST EN LABORATORIO.....	55
4.7.4	MATERIALES PARA NITROGENO KJELDAHL.....	55
4.7.5	MATERIALES PARA CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DEL REACTOR UASB .....	56
4.7.6	EQUIPOS PARA MUESTREO DIARIO.....	57
4.7.7	EQUIPOS PARA ANÁLISIS EN LABORATORIO DE ALCALINIDAD, DQO, SST Y ST .....	57
4.7.8	EQUIPOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA ACTIVIDAD METANOGÉNICA DEL EFLUENTE .....	58
4.7.9	EQUIPO PARA LA RECIRCULACIÓN DEL REACTOR UASB .....	58
4.7.10	EQUIPO PARA DETERMINAR LA COMPOSICIÓN DE BIOGAS.....	58
4.8	PROCEDIMIENTOS DE ANÁLISIS DE DATOS .....	58
V.	RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	60
5.1	DESCRIPCION DE LA PRODUCCIÓN DE DERIVADOS LACTEOS EN LA PLANTA DE LECHE UNALM. ....	60
5.2	COMPOSICIÓN DEL EFLUENTE DE LA PLANTA PILOTO DE LECHE.....	61
5.3	REACTOR UASB .....	62
5.3.1	DISEÑO, PUESTA EN MARCHA Y OPERACIÓN DEL REACTOR UASB.....	62
5.3.2	MONITOREO DE PARAMETROS DE CALIDAD DEL EFLUENTE.....	64
5.4	COMPOSICION DEL BIOGAS.....	75
5.5	TEMPERATURA DE AFLUENTE Y EFLUENTE DEL REACTOR.....	75
VI.	CONCLUSIONES .....	76
VII.	RECOMENDACIONES.....	78
VIII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	79
	ANEXOS.....	82

## ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO 1: COMPOSICIÓN DEL EFLUENTE GENERADO POR LA INDUSTRIA LÁCTEA .....	15
CUADRO 2: COMPOSICIÓN PORCENTUAL DEL SUERO DE QUESO.....	15
CUADRO 3: REACCIONES ACETOGÉNICAS QUE OCURREN EN LOS SISTEMAS ANAEROBIOS .....	22
CUADRO 4: PRINCIPALES REACCIONES METANOGÉNICAS .....	24
CUADRO 5: ANEXO 1 DE VALORES MÁXIMOS ADMISIBLES .....	33
CUADRO 6: ANEXO 2 DE VALORES MÁXIMOS ADMISIBLES (1) .....	34
CUADRO 7: PARÁMETROS EVALUADOS Y METODOLOGÍA APLICADA EN LOS ENSAYOS.....	40
CUADRO 8: METODOLOGÍA DE TOMA DE EFLUENTE DE LA PLANTA DE LECHE	41
CUADRO 9: METODOLOGÍA DE TOMA DE MUESTRA POR ETAPA .....	51
CUADRO 10: MONITOREO DE PARÁMETROS PARA LA ETAPA DE ARRANQUE....	53
CUADRO 11: MONITOREO DE PARÁMETROS PARA LA ETAPA DE OPERACIÓN...	53
CUADRO 12: VOLUMEN MENSUAL DE LECHE POR PROCESO Y GENERACIÓN DE EFLUENTE .....	60
CUADRO 13: CARACTERIZACIÓN DEL EFLUENTE DE LA PLANTA DE LECHE AL INICIO DE LA ETAPA DE ARRANQUE Y OPERACIÓN DEL REACTOR .....	61
CUADRO 14: ACTIVIDAD METANOGÉNICA DE BIOMASA .....	62
CUADRO 15: REACTOR UASB VS NT OS.090 .....	63
CUADRO 16: EVOLUCIÓN DEL INÓCULO DURANTE EL TIEMPO DE TRATAMIENTO .....	64
CUADRO 17: VALORES DE DQO DE AFLUENTE, EFLUENTE Y EFICIENCIA DE TRATAMIENTO DEL REACTOR UASB EN EL PERIODO 2012 - 2013 .....	65
CUADRO 18: EVOLUCIÓN DE SÓLIDOS VOLÁTILES, DQO ENTRADA Y CARGA MÁXICA.....	66
CUADRO 19: OTRAS EXPERIENCIAS VS ESTA INVESTIGACIÓN .....	70
CUADRO 20: COMPOSICIÓN DE BIOGÁS .....	75
CUADRO 21: SHAPIRO-WILK W TEST FOR NORMAL DATA.....	84
CUADRO 22: INTERVALOS DE CONFIANZA DE LA EFICIENCIA.....	85

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: ETAPAS DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA .....	17
FIGURA 2: DEGRADACIÓN DE LA GLUCOSA POR LAS BACTERIAS ACIDOGÉNICAS .....	20
FIGURA 3: POSIBLES RUTAS PARA LA CONVERSIÓN ANAEROBIA DE LA LACTOSA.....	25
FIGURA 4: ESQUEMA DE UN REACTOR UASB .....	27
FIGURA 5: DIMENSIONES DEL REACTOR.....	44
FIGURA 6: DISTRIBUCIÓN DE LAS CONEXIONES DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO .....	45
FIGURA 7: REACTOR UASB.....	46
FIGURA 8: VISTA DE LA BASE DEL REACTOR EN POSICIÓN INVERTIDA.....	47
FIGURA 9: VISTA DEL REACTOR UASB Y UBICACIÓN DE VÁLVULAS .....	48
FIGURA 10: COLECTOR DE GASES .....	50
FIGURA 11: MUESTREADOR DE GASES .....	54
FIGURA 12: COMPORTAMIENTO DE LA DQO DE ENTRADA VS THR.....	68
FIGURA 13: COMPORTAMIENTO DE LA VCO DE ENTRADA VS EFICIENCIA.....	69
FIGURA 14: COMPORTAMIENTO DE LA VCO DE ENTRADA VS THR.....	72
FIGURA 15: COMPORTAMIENTO DE LA DQO DE ENTRADA VS VCO .....	73
FIGURA 16: COMPORTAMIENTO DE LA DQO ENTRADA, DQO SALIDA Y LA EFICIENCIA .....	74
FIGURA 17: TEMPERATURA AMBIENTAL DURANTE LA INVESTIGACIÓN.....	90

## INDICE DE ANEXOS

ANEXO 1. RESULTADOS DE CARACTERIZACIÓN J. RAMÓN (21/05/2012) .....	82
ANEXO 2. RESULTADOS DE CARACTERIZACIÓN J. RAMÓN (27/11/2012).....	83
ANEXO 3. VALIDACIÓN ESTADÍSTICA DE LOS RESULTADOS .....	84
ANEXO 4. CONDICIÓN DEL INÓCULO DURANTE LA INVESTIGACIÓN .....	86
ANEXO 4. CONDICIÓN DEL EFLUENTE DURANTE LA INVESTIGACIÓN .....	87
ANEXO 5. CARGA MÁSCICA Y VELOCIDAD ASCENSIONAL DEL EFLUENTE DURANTE LA INVESTIGACIÓN.....	89
ANEXO 6. TEMPERATURA AMBIENTAL .....	90



## GLOSARIO DE TÉRMINOS

1. DQO.- Es la demanda química de oxígeno. Su determinación evalúa indirectamente la cantidad de materia orgánica presente en una muestra líquida. Se expresa en miligramos de oxígeno diatómico por litro ( $\text{mgO}_2/\text{L}$ ).
2. Micronutrientes.- Este término hace referencia a aquellos nutrientes que se requieren en pocas cantidades para el desarrollo de microorganismos.
3. Reactor UASB.- Es un sistema continuo anaerobio introducido por el Dr. Gatzel Lettinga en los años 70, empleado para el tratamiento biológico de aguas residuales. También es conocido como reactor anaerobio de flujo ascendente en manto de lodos.
4. SV.- Término empleado para los sólidos volátiles. Es decir aquella porción de los sólidos que se volatiliza cuando se queman en una mufla a  $550^\circ\text{C}$ .
5. SSV.- Término empleado para los sólidos volátiles suspendidos. Es decir aquellos sólidos mayores a  $1\mu\text{m}$  que son susceptibles a volatilizar en una mufla a  $550^\circ\text{C}$ .
6. TRH.- Tiempo de retención hidráulico. Su valor se obtiene al dividir el volumen del lecho de lodos del reactor entre el caudal de alimentación.
7. VCO.- Este término hace referencia a la velocidad de carga orgánica. La VCO es la cantidad de materia orgánica introducida diariamente en el reactor por unidad de volumen, es decir que depende de la concentración del influente y del tiempo de retención fijado.
8. Índice  $\alpha$ .- Es la relación que se obtiene al dividir la Alcalinidad Intermedia (obtenida al titular de 5.75 a 4.3 de pH) entre la Alcalinidad Parcial (obtenida al titular hasta 5.75 de pH).
9. VMA.- Este término hace referencia a los valores máximos admisibles. Los VMA es aquel valor de la concentración de elementos, sustancias o parámetros físicos y/o químicos, que caracterizan en un efluente no domestico que va a ser descargado a la red de alcantarillado sanitario.
10. DBO.- La demanda bioquímica de oxígeno (DBO) es un parámetro que mide la cantidad de materia susceptible de ser consumida u oxidada por medios biológicos que contiene una muestra líquida, disuelta o en suspensión. Se utiliza para medir el grado de contaminación; normalmente se mide transcurridos cinco días de reacción (DBO5).
11. AGV.- Este término hace referencia a los ácidos grasos volátiles. Son un subgrupo de ácidos grasos con cadenas carbonadas de menos de seis carbonos, su volatilidad se debe a la corta cadena carbonada que poseen.

## RESUMEN

Esta tesis fue realizada con el fin de evaluar la tratabilidad del efluente generado por la planta piloto de leche UNALM con un reactor UASB, la cual hizo posible tener una alternativa de tratamiento para mitigar el efecto de la contaminación producido por el vertimiento de la planta de leche.

Se construyó un reactor UASB a escala laboratorio en la cual se trabajó con una mezcla de tres inóculos de diferentes procedencias. El efluente de la planta de leche fue colectado en un tanque ecualizador el cual luego regular el pH fue la fuente de alimentación para el reactor; además tuvo un sistema de recirculación para mejorar la eficiencia. El tratamiento se dividió en la etapa de arranque, en la cual se buscó la aclimatación de los microorganismos alimentando al reactor a concentraciones bajas de DQO previamente colectado en un tanque ecualizador por medio de una muestra simpley la etapa de operación donde se trabajó con una muestra compuesta colectada en el tanque ecualizador la cual fue representativa de un día de producción.

La DQO fue el parámetro de referencia para medición de eficiencia de tratamiento, se obtuvo un valor promedio de 74.3 % y 77.9% en la etapa de arranque y operación respectivamente. Además se trabajó con una caudal promedio de alimentación de 75.3 l/día, TRH promedio de 2.8 días, velocidad ascensional promedio de 0.191 m/h y VCO de entre 0.107 a 0.910 Kg DQO/(m<sup>3</sup> x día).

## SUMMARY

This thesis was conducted for the purpose of evaluate the treatability of the effluent generated by the pilot plant milk UNALM with UASB reactor, which made it possible to have an alternative treatment to mitigate the effect of pollution caused by the dumping of the plant milk.

Reactor Upflow Anaerobic Sludge Blanket laboratory scale was constructed wherein It worked with a mixture of three inocula from different sources. The plant effluent milk was collected into a tank equalizer which pH was then regulate the power supply to the reactor; also had a recirculation system to improve efficiency. Treatment was divided into the start stage, wherein the acclimatization of the microorganisms was sought, feeding the reactor at low COD concentrations previously collected in an equalizer tank by means of a single sample and the operation stage where he worked with a composite sample collected in the equalizer tank which was representative of a production day.

The COD was the reference parameter for measuring efficiency of treatment, an average value of 74.3% and 77.9% at the stage of starting and operating respectively was obtained. Also worked with an average feed flow rate of 75.3 l / day, TRH 2.8 días average speed ascension 0.191 m / h and VCO from 0107 to 0910 kg COD / (m<sup>3</sup> x day).

## I. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso muy utilizado por la industria en sus procesos para la elaboración de diversos productos. Estos procesos ya sea por etapas o en conjunto generan efluentes contaminados con productos orgánicos e inorgánicos, que son vertidos al alcantarillado, a los ríos, a los lagos o al mar, causando así impactos negativos para el medio ambiente.

La industria de los alimentos, particularmente la elaboración de productos lácteos, vierte en sus efluentes concentraciones significativas de materia orgánica; y en menor cantidad pero no menos importante material inorgánico. En la actualidad nuestro país, cuenta con una ley de vertimientos de efluentes al alcantarillado (DS N° 021-2009 - Vivienda), la cual regula parámetros físicos y químicos con Valores Máximos Admisibles (VMA) que no deben ser superados. De este modo tratar los vertimientos se convierte en una necesidad, tanto en el aspecto económico (evitando multas o cierres), como en el aspecto ambiental (mitigando la contaminación y preservando la biodiversidad que se encuentra en los cuerpos de agua).

La Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), cuenta con varias actividades productivas, una de ellas se desarrolla en la Planta Piloto de Leche, donde se transforma la leche, principalmente en yogurt, leche embolsada y el queso. En la elaboración de estos productos lácteos se origina un efluente cargado con materia orgánica, el mismo que es vertido sin ningún tipo de tratamiento al alcantarillado público, convirtiéndose así en una fuente de contaminación importante y, por lo que buscar una alternativa de solución deviene una necesidad prioritaria.

Esta investigación se propone evaluar la tratabilidad del efluente generado por la Planta Piloto de Leche de la UNALM utilizando un reactor UASB, para disminuir el contenido o carga orgánica del efluente industrial.

## **II. OBJETIVO DE LA INVESTIGACIÓN**

### **2.1 OBJETIVO GENERAL**

- Evaluar la tratabilidad del efluente generado por la Planta Piloto de Leche de la UNALM, aplicando un reactor UASB.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:**

- Caracterizar el efluente de la planta de leche para definir el potencial de tratamiento anaerobio.
- Diseñar y construir un Reactor UASB a escala piloto.
- Seleccionar el tipo de lodo que se utilizará como inóculo en el reactor.
- Planificar la puesta en marcha y la operación del reactor UASB.
- Monitorear y controlar parámetros en la etapa de arranque de operación del reactor UASB para evaluar la eficiencia de remoción de materia orgánica en estas dos etapas del reactor.

### III. REVISIÓN DE LITERATURA

#### 3.1 EFLUENTES INDUSTRIALES LÁCTEOS

Los efluentes industriales son todas las descargas residuales que han sido derivadas de procesos industriales y sufren un cambio en su composición debido a las actividades que han sido expuestas, perdiendo su calidad y requiriendo de un tratamiento.

La industria láctea al igual que otras agroindustrias genera aguas residuales con una elevada carga orgánica. Esta carga orgánica contiene principalmente los sobrantes de los carbohidratos, proteínas y grasas provenientes de la leche (Demirel B. et al, 2004). En la Cuadro 1 muestra la composición promedio de las aguas residuales generada por la industria láctea.

Dentro de los tipos de efluentes que vierte esta industria encontramos que el suero de queso, es uno de los que presenta valores altos de DQO, sus valores fluctúan en el rango de los 60,000 mg/l y 80,000mg/l (Mockaitis et al, 2005). Debido a que es muy rico en lactosa y proteínas (caseína), el suero de queso es conocido como un subproducto de la industria láctea (Ergüder et al, 2000).

En el caso de la Planta Piloto de Leche de la UNALM, el suero de queso se mezcla con los efluentes generados por el embolsado de leche, preparación de yogurt, aseo de ambientes (pisos) y limpieza de equipos, por lo que la concentración antes señalada tiende a disminuir.

El suero es el principal residuo que se elimina en la elaboración de queso; éste presenta un color verde amarillento compuesto de lactosa, proteínas, sales minerales y grasa; sin embargo, las cantidades de cada componente varían considerablemente en función del tipo de queso a elaborar y dependen sobre todo de la eficiencia del proceso de elaboración. ElCuadro 2 muestra la composición del suero de queso.

**Cuadro 1: Composición del efluente generado por la industria láctea**

Parámetro	Unidad	Leche de consumo	Quesos	Derivados Lácteos	Helados
pH	Unidades de pH	8.5	6.9	8.5	8
DQO	mg/l	1,775	4,500	4,000	925
DBO <sub>5</sub>	mg/l	1,050	2,750	1,750	620
Sólidos Suspendidos	mg/l	435	850	825	425
Fósforo	mg/l	20	35	6.25	5.5
Nitrógeno Kjeldahl	mg/l	65	100	100	75
Conductividad	mS/cm	1.650	3.150	1.250	1.200
Cloruros	mg/l	140	220	100	135
Nitratos	mg/l	50	105	90	75
Nitritos	mg/l	10	35	0.2	0.3
Aceites y Grasas	mg/l	105	365	110	25
Detergentes SAAM	mg/l	3.5	7	7.5	6

Fuente: Federación Nacional de Industrias Lácteas, Sevilla-España 2008.

**Cuadro2: Composición porcentual del suero de queso**

Compuesto	Porcentaje de Composición
Carbohidratos (Lactosa principalmente)	4.5-5.0
Proteínas	< 1
Sales minerales (NaCl, KCl y Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> )	1.0-3.0
Grasa	0.4-0.5
Ácido Láctico	< 1

Fuente: Gelegenis et al, 2007. Optimization of biogás production by co-digesting whey with diluted poultry manure. Panesar, et al, 2007. Bioutilisation of whey for lactic acid production.

### **3.2 CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DEL SISTEMA DE DEPURACIÓN**

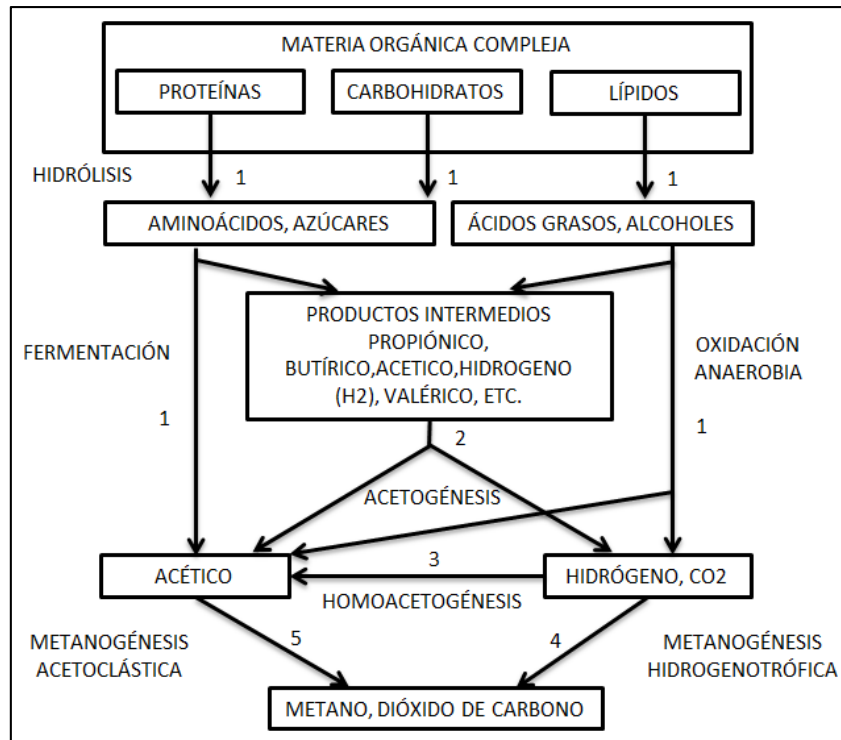
Las aguas residuales de la industria láctea tienen una concentración moderada de materia orgánica fácilmente biodegradable. Por esta razón los procesos biológicos son los más adecuados, para tratar estas aguas residuales. (Vandamme et al, 1980; Bull et al, 1981; Méndez et al, 1989; Rico et al, 1989; citados por Rico et al, 1990). Los procesos biológicos se distinguen a su vez en procesos aerobios y procesos anaerobios, dependiendo si requieren para su operación del suministro de aire (oxígeno) o no. La elección de estos dos tratamientos se basa fundamentalmente en la concentración de carga orgánica que posee el efluente. Si presenta una concentración significativa mayor a 1,000 mg /l de DQO se empieza a tener en cuenta el tratamiento anaerobio para esta agua, de lo contrario se aplicaría el tratamiento aerobio.

Debido al contenido orgánico del suero, restos de leche y yogurt, el proceso de tratamiento biológico básico sólo puede ser la digestión anaerobia, mientras que el proceso de tratamiento regular de lodos activados es totalmente inapropiado, porque el costo de suministrar oxígeno sería alto y aumentaría la generación de lodos. El tratamiento anaerobio es recomendable para efluentes de elevadas cargas orgánicas (Ergüder et al, 2000), sin requerir oxígeno por lo que presenta un bajo costo, genera poca cantidad de lodo en exceso, requiere de poco espacio (Demirel et al, 2004) y permite la recuperación de cantidades significativas de energía en forma de gas metano (Ergüder et al, 2000).

### **3.3 ETAPAS DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA**

La digestión anaeróbica es un proceso muy complejo por el número de reacciones bioquímicas que ocurren debido a la cantidad de microorganismos involucrados en ellas. En la Figura 1 se puede apreciar la dinámica de la digestión anaerobia.





**Figura 1: Etapas de la Digestión Anaerobia**

Fuente: Esquema de reacciones de la digestión anaerobia de materiales poliméricos (Pavlosthatis et al, 1991) citado por Marti N. 2006. 1: bacterias fermentativas; 2: bacterias acetogénicas que producen hidrógeno; 3: bacterias homoacetogénicas; 4: bacterias metanogénicas hidrogenotróficas; 5: bacterias metanogénicas acetoclásticas.

### 3.3.1 PROCESO MICROBIOLÓGICO Y BIOQUÍMICO DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA

Los estudios bioquímicos y microbiológicos realizados hasta ahora, dividen el proceso de descomposición anaerobia de la materia orgánica en cuatro fases o procesos:

- Hidrólisis
- Acidogénica o Fermentativa
- Acetogénica
- Metanogénica

La primera fase es la hidrólisis de partículas y moléculas complejas (proteínas, hidratos de carbono y lípidos) que son hidrolizadas por enzimas extracelulares producidas por los microorganismos acidogénicos o fermentativos. Como resultado se producen compuestos solubles más sencillos (aminoácidos, glúcidos y ácidos grasos de cadena larga) que son fermentados por las bacterias acidogénicas dando lugar, principalmente, a ácidos grasos de cadena corta, alcoholes, hidrógeno, dióxido de carbono y otros productos intermedios. Los ácidos grasos de cadena corta son transformados en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono, mediante la acción de los microorganismos acetogénicos. Por último, los microorganismos metanogénicos producen metano a partir de  $H_2$  y  $CO_2$  (Martí, 2006).

#### **a. HIDRÓLISIS:**

Esta etapa consiste básicamente en la degradación anaerobia de sustratos orgánicos complejos a más simples por acción de enzimas extracelulares producidas por microorganismos hidrolíticos (bacterias hidrolítico-acidogénicas). Es necesario que el sustrato pueda atravesar fácilmente las paredes celulares de las bacterias, por ello la materia orgánica debe encontrarse en forma soluble. Se puede decir que la hidrólisis es la encargada de proporcionar los sustratos orgánicos solubles para la digestión anaerobia.

La etapa hidrolítica puede ser el proceso limitante de la velocidad global del proceso sobre todo cuando se tratan residuos con alto contenido de sólidos (Pavlosthatis et al, 1991; citado por Martí, 2006). Además, la hidrólisis depende de la temperatura del proceso, del tiempo de retención hidráulico, de la composición del sustrato (porcentaje de lignina, carbohidratos, proteínas y grasas), del tamaño de partículas, del pH, de la concentración de  $NH_4^+$  y de la concentración de los productos de la hidrólisis (Speece, 1983; citado por Martí, 2006).

Cualquier sustrato se compone de tres tipos básicos de macromoléculas que son los hidratos de carbono, proteínas y lípidos.

Las proteínas constituyen un sustrato muy importante en el proceso de digestión anaerobia por ser la fuente principal de aminoácidos por su elevado valor nutricional. Las proteínas son

hidrolizadas en péptidos y aminoácidos por la acción de enzimas proteolíticas llamadas proteasas. Parte de estos aminoácidos son utilizados directamente en la síntesis de nuevo material celular y el resto son degradados a ácidos grasos volátiles, dióxido de carbono, hidrógeno, amonio y sulfuro en etapas posteriores del proceso.

La degradación de lípidos en ambientes anaerobios comienza con la ruptura de las grasas por la acción de enzimas hidrolíticas denominadas lipasas produciendo ácidos grasos de cadena larga y glicerol.

La velocidad de degradación de los materiales lignocelulósicos, compuestos principalmente por lignina, celulosa y hemicelulosa, es tan lenta que suele ser la etapa limitante del proceso de hidrólisis y por tanto, de la degradación anaerobia de determinados sustratos. Esto es debido a que la lignina es muy resistente a la degradación por parte de microorganismos anaerobios, afectando también a la biodegradabilidad de la celulosa, de la hemicelulosa y de otros hidratos de carbono. Los principales productos de la hidrólisis de la celulosa son celobiosa y glucosa, mientras que la hemicelulosa produce pentosas, hexosa y ácidos urónico (Martí, 2006).

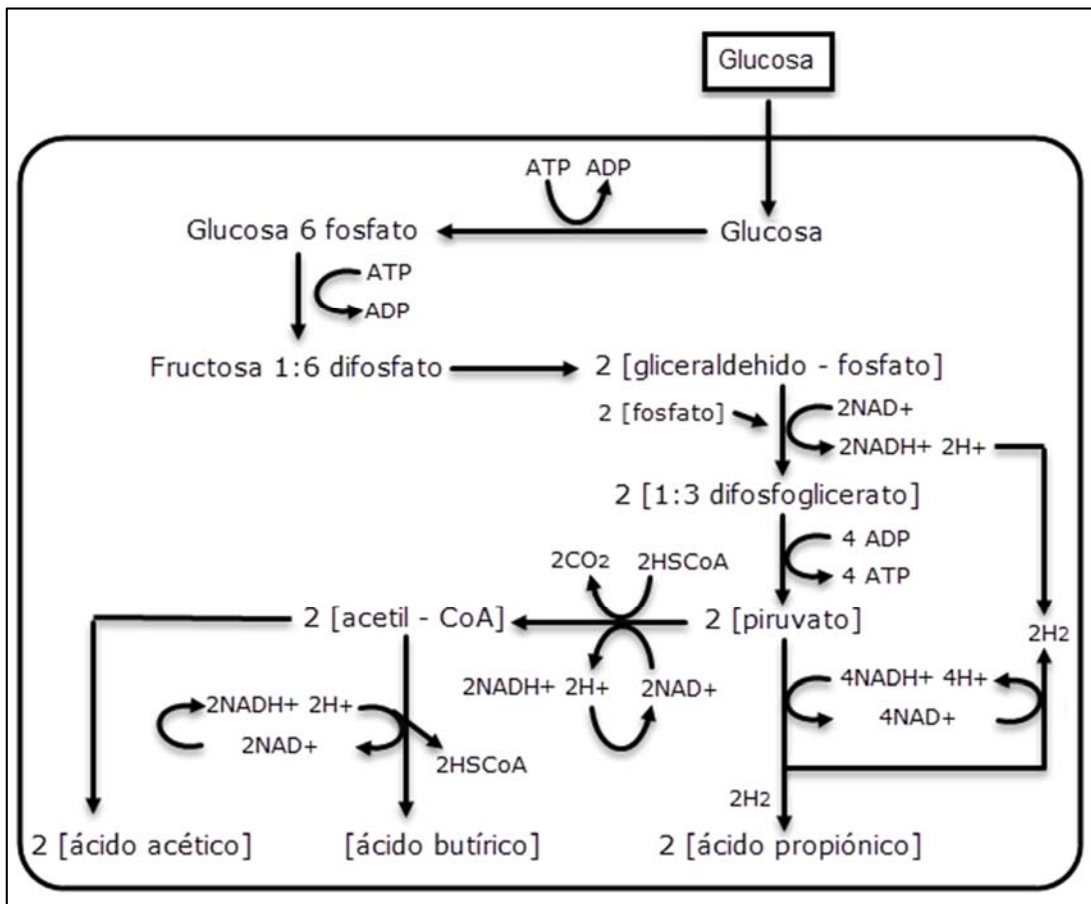
#### **b. ACIDOGÉNICA O FERMENTATIVA:**

En esta etapa tiene lugar la fermentación de las moléculas orgánicas solubles en compuestos que pueden ser utilizados directamente por las bacterias metanogénicas (acético, fórmico, H<sub>2</sub>) y compuestos orgánicos más reducidos (propiónico, butírico, valérico, láctico y etanol principalmente) quienes serán oxidados por bacterias acetogénicas en la siguiente etapa del proceso anaerobio. Las bacterias acidogénicas comúnmente encontradas en digestores incluyen especies como *Butyrivibrio*, *Propionibacterium*, *Clostridium*, *Bacteroides*, *Ruminococos*, *Bifidobacterium*, *Lactobacillus*, *Streptococos* y *Enterobacterias*. (Campos et al, 2012; citado por Liviac, 2013)

- **Fermentación de carbohidratos solubles:**

La principal ruta metabólica de degradación de glucosa para formar ácidos orgánicos es la de Embden-Meyerhof (Ver Figura 2), que tiene como principal intermediario el piruvato.

La fermentación de azúcares se realiza con diversos tipos de microorganismos. En función de cada organismo, la ruta metabólica y los productos finales son diferentes. Los principales microorganismos asociados a la degradación de la glucosa son del género *Clostridium* quienes convierten la glucosa en ácido butírico, ácido acético, CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>. La glucosa se convierte en piruvato mediante la ruta Embden-Meyerhof, este se desdobra a su vez Acetil-CoA y en CO<sub>2</sub>. El Acetil-CoA se reduce en los productos de fermentación empleando como transportador de electrones el NADH derivado de las reacciones glucolíticas de la ruta Embden-Meyerhof (Martí, 2006).



**Figura 2: Degradación de la Glucosa por las Bacterias Acidogénicas**

Fuente: Simplificación de la ruta Metabólica de Embden-Meyerhof citado por Martí N. 2006.

- **Fermentación de aminoácidos:**

Los principales productos de la fermentación de aminoácidos y de otras moléculas hidrogenadas son ácidos grasos de cadena corta, succínicos, aminovaléricos e H<sub>2</sub>. La fermentación de aminoácidos se considera un proceso rápido y que, en general, no limita la velocidad de degradación de compuestos proteicos.

Las bacterias proteolíticas que mayoritariamente se han identificado, pertenecen al género *Clostridium*, aunque otras especies tales como *Peptococcus* y *Bacteroides* también están presentes. (Martí, 2006).

Los productos finales de la oxidación son NH<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub> y un ácido carboxílico con un átomo de carbono menos que el aminoácido oxidado (n-butírico y ácido isobutírico, isovalérico, caproico, sulfuro de hidrógeno, metilcaptano, cadaverina, putrescina, etc, según el aminoácido del que proceda).

- **Oxidación anaerobia de ácidos grasos de cadena larga:**

Los ácidos grasos de cadena larga son oxidados a ácidos grasos de cadena corta por el mecanismo de  $\beta$ -oxidación. Los ácidos grasos libres son introducidos en la célula a través de la pared celular y una vez en su interior, son transformados en el correspondiente tio-ester-CoA. La  $\beta$ -oxidación es un ciclo en espiral que va liberando un acetil-CoA en cada bucle, produciendo, principalmente ácido acético.

En condiciones anaerobias, este mecanismo es termodinámicamente desfavorable y muy dependiente de la presión parcial del hidrógeno, por lo que es de gran importancia la acción simbiótica de los microorganismos consumidores de hidrógeno para que se pueda producir (Martí, 2006).

**c. ACETOGÉNICA:**

Mientras que algunos productos de la fermentación pueden ser metabolizados directamente por los organismos metanogénicos (H<sub>2</sub> y ácido acético), otros (etanol, ácidos grasos volátiles como valeriato, butirato, propionato, etc. y algunos compuestos aromáticos) deben ser transformados en productos más sencillos, acetato e H<sub>2</sub>, a través de las bacterias acetogénicas.

Representantes de los microorganismos acetogénicos son el *Syntrophobacter wolini* (que descompone el ácido Propiónico) y el *Syntrophomonas wolfei* (que descompone el butírico). Los ácidos valérico y butírico son descompuestos por las mismas especies (Campos et al, 2012; citado por Liviac, 2013).

Desde el punto de vista termodinámico, las reacciones de acetogénesis no son posibles porque en condiciones estándar (pH=7, T=25°C, P=1 atm) éstas presentan energías libres de reacción positiva como se muestra en el Cuadro 3:

**Cuadro 3: Reacciones acetogénicas que ocurren en los sistemas anaerobios**

Reacciones Acetogénicas	$\Delta G^{\circ}$ (KJ)
<b>Etanol y Láctico</b>	
$Etanol + H_2O \rightarrow Acetato + H^+ + 2H_2$	+ 9.6
$Lactato^{-1} + 2H_2O \rightarrow Acetato^{-1} + H^+ + 2H_2 + HCO_3^{-}$	- 4.2
<b>Ácidos Grasos</b>	
$Acetato^{-1} + 4H_2O \rightarrow H^+ + 4H_2 + 2HCO_3^{-}$	+ 104.6
$Propionato^{-1} + 3H_2O \rightarrow Acetato^{-1} + HCO_3^{-} + H^+ + 3H_2$	+ 076.1
$Butirato^{-1} + 2H_2O \rightarrow 2 Acetato^{-1} + H^+ + 2H_2$	+ 48.1
$Valerato^{-1} + 3H_2O \rightarrow 3 Acetato^{-1} + 2H^+ + 4H_2$	+ 96.2
<b>Aminoácidos</b>	
$Alamina + 3H_2O \rightarrow Acetato^{-1} + HCO_3^{-} + NH_4^+ + H^+ + 2H_2$	+ 7.5
$Aspartato^{-1} + 4H_2O \rightarrow Acetato^{-1} + 2HCO_3^{-} + NH_4^+ + H^+ + 2H_2$	- 14.0
$Leucina + 3H_2O \rightarrow Isovalerato^{-1} + HCO_3^{-} + NH_4^+ + H^+ + 2H_2$	+ 4.2
$Glutamato^{-1} + 4H_2O \rightarrow Propionato^{-1} + 2HCO_3^{-} + NH_4^+ + H^+ + 2H_2$	- 5.8
$Glutamato^{-1} + 7H_2O \rightarrow Acetato^{-1} + 3HCO_3^{-} + NH_4^+ + 3H^+ + 5H_2$	+ 70.3

Fuente: Phosphorus Precipitation in Anaerobic Digestion Process, Nuria Martí, 2006.

Sin embargo, a presiones parciales de H<sub>2</sub> (del orden 10<sup>-4</sup> – 10<sup>-5</sup> atm), estas reacciones pasan a ser termodinámicamente favorables y la variación de energía libre es suficiente para permitir la síntesis de ATP y el crecimiento bacteriano. Por tanto, el principal inhibidor de la acetogénesis, cuya acumulación provoca la rápida acumulación de sustratos, es la acumulación de hidrógeno molecular. Un tipo especial de microorganismos acetogénicos, es el llamado

homoacetogénico. Este tipo de bacteria es capaz de crecer heterotróficamente en presencia de azúcares o compuestos monocarbonados (como la mezcla  $H_2/CO_2$ ) produciendo como único producto acetato.

Al contrario de las bacterias acetogénicas, éstas no producen hidrógeno como resultado de su metabolismo, sino que lo consumen como sustrato. Según se ha estudiado, el resultado neto del metabolismo homoacetogénico permite mantener bajas presiones parciales del hidrógeno y, por tanto, permite la actividad de las bacterias acidogénicas y acetogénicas.

Las bacterias metanogénicas hidrogenotróficas también consumen  $H_2$  ayudando así al mantenimiento de presiones parciales bajas del  $H_2$ . Los principales microorganismos homoacetogénicos que han sido aislados son *Acetobacterium woodii* o *Clostridium acetatum* (Martí, 2006).

#### **d. METANOGENICA**

Los microorganismos metanogénicos completan el proceso de digestión anaerobia mediante la formación de metano a partir de sustratos monocarbonados o con dos átomos de carbono unidos por un enlace covalente: acetato,  $H_2/CO_2$ , formato, metanol y algunas metilaminas.

Los organismos metanogénicos se clasifican dentro del dominio *Archaea* y tienen características comunes que los diferencian del resto de procariontes. Un ejemplo es que todos ellos poseen varias coenzimas especiales, siendo la coenzima M, la que participa en el paso final de la formación del metano.

Se pueden establecer dos grandes grupos de microorganismos, en función del sustrato principal que metabolizan que son los *hidrogenotróficos*, que consumen  $H_2/CO_2$  y fórmico; y los *acetoclásticos*, que consumen acetato, metanol y algunas aminas. Las principales reacciones metanogénicas se muestran en el Cuadro 4.

**Cuadro 4: Principales reacciones metanogénicas**

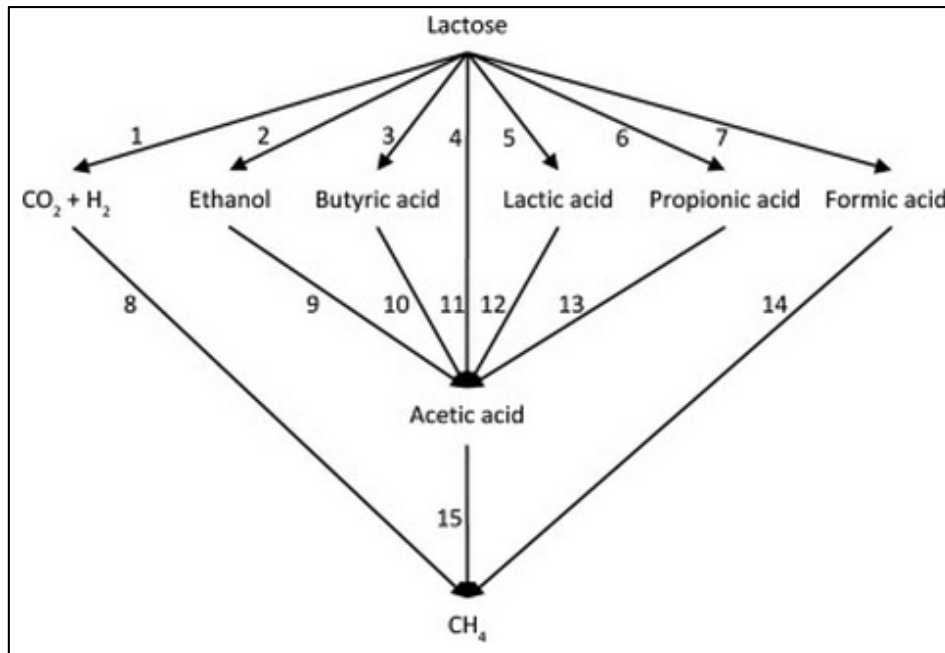
<b>Reacciones</b>
<p><b>Reacciones Hidrogenotróficas</b></p> $4H_2 + H^+ + 2HCO_3^- \rightarrow \text{Acetato} + 4H_2O$ $4H_2 + 4S^0 \rightarrow 4HS^- + 4H^+$ $4H_2 + 2HCO_3^- + H^+ \rightarrow CH_4 + 3H_2O$ $4H_2 + 4SO_4^{2-} + H^+ \rightarrow HS^- + 4H_2O$ $4H_2 + 4 \text{ Fumarato} \rightarrow 4 \text{ Succinato}$ $4H_2 + NO_3^- + 2H^+ \rightarrow NH_4^+ + 3H_2O$
<p><b>Interconversión Formato-Hidrógeno</b></p> $H_2 + HCO_3^- \rightarrow \text{Formato} + H_2O$
<p><b>Metanogénesis Acetoclástica</b></p> $\text{Acetato} + H_2O \rightarrow HCO_3^- + CH_4$
<p><b>Metanogénesis a Partir de Otros Substratos</b></p> <p><b>Fórmico</b></p> $4HCOOH \rightarrow CH_4 + 3CO_2 + 2H_2O$ <p><b>Metanol</b></p> $4CH_3OH \rightarrow 3CH_4 + CO_2 + 2H_2O$ <p><b>Trimetil-Amina</b></p> $4(CH_3)_3N + 6H_2O \rightarrow 9CH_4 + 3CO_2 + 4NH_3$ <p><b>Dimetil-Amina</b></p> $2(CH_3)_2NH + 2H_2O \rightarrow 3CH_4 + CO_2 + 2NH_3$ <p><b>Monometil-Amina</b></p> $4(CH_3)NH_2 + 2H_2O \rightarrow 3CH_4 + CO_2 + 4NH_3$

Fuente: Phosphorus Precipitation in Anaerobic Digestion Process, Nuria Martí, 2006.

### 3.3.2 DEGRADACIÓN ANAEROBIA DE LA LACTOSA

Como se ha mencionado anteriormente el suero se compone principalmente de lactosa. A continuación en la Figura 3 se indican algunos microorganismos para las posibles rutas de conversión anaerobia de la Lactosa en metano (Liviác, 2013).





**Figura 3: Posibles Rutas para la Conversión Anaerobia de la Lactosa**

Fuente: Hassan y Nelson. Anaerobicfermentation of dairyfoodwastewater

(Liviac, 2013)

Ruta 1: *Leuconostocmesenteroides*, *Escherichiacoli*

Ruta 2: *L. mesenteroides*, *E. coli*

Ruta 3: *Clostridium butyricum*

Ruta 4: *L. mesenteroides*, *C. butyricum*, *Eubacterium spp.*

Ruta 5: *Streptococcus*, *thermophilus*, *Lactococcuslactis*, *Lactobacillus delbrueckii ssp. Bulgaricus*.

Ruta 6: *Clostridiumpropionicum*

Ruta 7: *Strep.thermophilus*, *Actinobacillussuccinogenes*, *Mannheimia succiniciproducens*, *E. coli*.

Ruta 8: *Methanomicrobium*, *Methanobrevibacter*, *Methanocalculus*

Ruta 9: *Desulfovibrio spp.*; *Clostridiumtyrobutyricum*

Ruta 10: *Syntrophomonaswolfei*

Ruta 11: *Clostridiumformicoaceticum*, *Acetobacteriumwoodii*, *Desulfovibrio spp.*

Ruta 12: *Methanosarcina*, *Methanosaeta*

Ruta13: *Syntrophobacterwolunii*

Ruta14: *Methanomicrobium*, *Methanoculleus*, *Methanofollis*

Ruta 15: *Methanosarcina*, *Methanosaeta*.

### 3.3.3POTENCIAL ENERGÉTICO DEL METANO PRODUCIDO POR UN UASB

Para un sistema anaerobio, la DQO (Demanda Química de Oxígeno) puede considerarse un parámetro conservativo, es decir, la suma de las DQO de entrada debe ser igual a la suma de las DQO de salida.

$$DQO\ Influyente = DQO\ Efluente + DQO\ Biogas$$

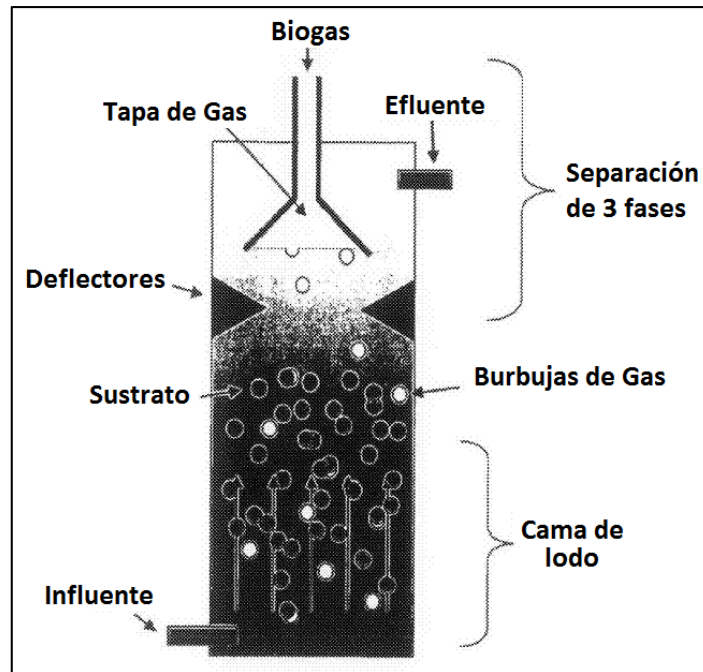
Si se considera un biogás formado exclusivamente por CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>, y teniendo en cuenta que la DQO del CO<sub>2</sub> es nula, la DQO eliminada en el residuo se correspondería con la DQO obtenida en forma de metano, lo cual significa 2.857 Kg DQO por m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> que en otras unidades es 0.35 m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub> por Kg de DQO eliminada a P=1 atm y 25°C. Atendiendo a la potencia calorífica del metano, estos valores corresponderían aproximadamente a 3.5 KW·h/Kg DQO eliminada, en unidades de energía primaria.

Esto confiere a los sistemas anaerobios una clara ventaja frente a los sistemas aerobios de tratamiento de residuos orgánicos y aguas residuales, para los cuales el consumo de energía para transferir oxígeno se encuentra alrededor de 1 KW·h/Kg O<sub>2</sub> consumido. Variaciones sobre los valores anteriores pueden ser debidas a posibles acumulaciones en el reactor, a la producción de otros gases (H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, etc.), o a que la DQO medida no sea tan sola debida al carbono oxidable (IDAE, 2007).

### **3.4 REACTOR ANAEROBIO DE FLUJO ASCENDENTE (UASB)**

El Reactor anaerobio de flujo ascendente de manto de lodos (UASB), fue introducido por el Dr. Gatzeltinga en Holanda en los años 70 y extensivamente desarrollado por otros.

El reactor UASB por lo general es construido de concreto. El líquido a tratar o afluente entra por unas tuberías que se conectan en la parte inferior del reactor. El afluente asciende por el manto de lodos hasta llegar a la parte superior, donde se convierte en efluente a la hora del aforo. Durante el ascenso se va generando biogás debido a las bacterias contenidas en el lodo, este biogás comúnmente es colectado en la parte superior por campanas o separadores. También cuenta con un sistema de recirculación, el cual consiste en retornar el efluente tratado y juntarlo con el afluente para entrar nuevamente al reactor, eso ayuda a mejorar la eficiencia de remoción de materia orgánica (Ver Figura 4).



**Figura 4: Esquema de un Reactor UASB**

Fuente: Adaptado de Yan (1989)

El UASB ha llegado a ocupar un importante lugar en el ámbito del tratamiento biológico de aguas residuales. Con numerosos avances realizados en el desarrollo del lodo, la manipulación microbiana, la hidrología del reactor, controles de aguas arriba, asociaciones con otros reactores para generar híbridos, etc., las aguas residuales biodegradables que varían en concentración y características ahora pueden ser tratadas con el UASB (Sankar et al, 2006).

El dimensionamiento de reactores UASB para aguas residuales industriales se hace con frecuencia en base a la velocidad de carga orgánica admisible (VCO). La VCO a su vez depende principalmente de la actividad del lodo, la temperatura, la eficiencia que se busca, la concentración del lodo y el tipo de sistema de alimentación.

Según Vela (2001) los parámetros típicos de operación del UASB son por lo general:

- Velocidad de carga orgánica en el rango de 5000-15000 mg DQO/l-día.
- Tiempo Hidráulico de Residencia en el rango de 0.2-2 días.
- Concentración de biomasa en el rango de 30000-40000 mg SSV/l.
- Velocidad ascensional en el rango de 0.5-1.3 m/h.

Además de tener en cuenta estos parámetros es importante considerar una correcta distribución del afluente, una velocidad ascensional constante y una producción de gas metano.

El reactor de tipo UASB ha sido empleado exitosamente para las aguas residuales de las industrias lácteas en toda escala durante dos décadas. Tratando efluentes de concentraciones entre 12-60 gDQO/l. Con tasas de remoción de carga orgánica de 85 a 99% y un tiempo de retención hidráulico (TRH) de 6 días y velocidades de carga orgánica (VCO) en el rango de 2 a 7.3gDQO/m<sup>3</sup>·día. Siendo el TRH el tiempo teórico que permanece el afluente en el reactor y obteniéndolo cuando se divide el volumen del digestor entre el flujo de alimentación.

### **3.4.1 ENSAYOS ANAEROBIOS**

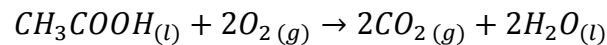
Los ensayos anaerobios permiten evaluarla actividad metanogénica del lodo, a la vez permite interpretar cuan activas están las bacterias, esto en función del tiempo y de la cantidad de metano producido en la prueba. El metano que se genera es producto del consumo de materia orgánica del efluente por las bacterias. Existe una relación directa entre la actividad y la eficiencia de tratamiento, esto quiere decir, que cuando mayor sea la actividad del lodo mayor será la eficiencia del tratamiento.

#### **a) DETERMINACIÓN DE LA ACTIVIDAD METANOGENICA**

La determinación de los parámetros cinéticos para todos los grupos bacterianos implicados en el proceso de la degradación anaerobia puede resultar difícil y trabajosa. Por ello, se han desarrollado técnicas que permiten caracterizar la actividad por medio de un único parámetro, la actividad máxima. Como la etapa metanogénica se convierte en la reacción limitante del proceso de tratamiento de aguas residuales, la actividad metanogénica se puede tomar como representante de la velocidad global del proceso. Es por ello que de manera general se habla de actividad metanogénica de un lodo. El método a seguir será el propuesto por Soto et al, 1992.

Para la determinación de la actividad metanogénica específica de un lodo anaerobio se usa como sustrato ácido acético o una mezcla de ácidos acético, propiónico y butírico. Se empleará 2g DQO/l.

Esta DQO necesaria se traducirá en términos de ácido acético necesario, mediante la siguiente reacción.



La concentración de inóculo o biomasa inicial se expresa generalmente como la concentración en sólidos volátiles en suspensión del lodo, debido a que no se puede determinar de una manera simple la concentración de microorganismos de un grupo bacteriano específico. Se considerará para la prueba una concentración de 5 gSV/l.

En cuanto al tamaño del digestor a emplear, un volumen de 100mL resulta suficientemente preciso para la determinación de la actividad metanogénica máxima, obteniendo valores de actividades muy similares o ligeramente inferiores respecto al uso de digestores de 1500mL provistos de agitación.

El digestor se conecta a un frasco de Mariotte que contiene una disolución de NaOH de 25 g/l. El biogás producido se recoge en el frasco de Mariotte. El CO<sub>2</sub> del biogás reacciona con la solución de NaOH, formando carbonato.

De esta forma sólo el metano alcanza el espacio libre de la botella de sosa, desplazando un volumen equivalente de líquido. Este volumen se recoge en una probeta calibrada. Se añade también Na<sub>2</sub>S como reductor y NaHCO<sub>3</sub> (1 g/l) como fuente de alcalinidad. Por último se ajusta el pH a 7.

La Actividad Metanogénica se calculó a partir de la velocidad de producción de metano, según la ecuación (Soto et al., 1992):

$$(A_{cm})_{CH_4} = \left( \frac{dV_{CH_4}}{dt} \right) \times (V_r f_t) \frac{g DQO_{CH_4}}{g SSV \times d}$$

Dónde:

$(A_{cm})_{CH_4}$ : Actividad Metanogénica

$(dV)_{CH_4}/dt$ : Velocidad de producción de metano

$V_r$ : Volumen activo del reactor

$X_o$ : Masa de Microorganismos, dado por los SSV del Lodo.

$f_t$  : Factor de conversión que representa la DQO por unidad de volumen de metano.

Este factor depende de la temperatura y humedad del gas y toma los valores de (1/385) g DQO/ mLCH<sub>4</sub> para metano húmedo a 20°C.

### 3.5 PARAMETROS DE CARACTERIZACION DEL AGUA RESIDUAL

Entre los principales parámetros que deben ser considerados para la caracterización del agua residual que será tratada aplicando un tratamiento anaerobio se tiene los siguientes:

**a) Demanda Química de Oxígeno.-** Evalúa indirectamente la cantidad de materia orgánica presente en un tiempo relativamente rápido. Será útil para obtener valores muy aproximados de la cantidad de materia orgánica del efluente en mg/l que quiere tratarse; es aproximado ya que los valores que se obtendrán también se incluirán la parte inorgánica. Además es importante obtener su valor por ser el principal parámetro a evaluar (Vela, 2001).

**b) Rango de pH.-** Su valor permite saber si el líquido a tratar necesita adecuarse previamente o no, ello debido a que el rango óptimo de trabajo de las bacterias metanogénicas es en condiciones de pH neutro, se tiene buenos niveles de actividad cuando se trabaja en un rango de 6,5 a 8,2. La metanogénesis continúa a pH 6,0 e inclusive a menores valores con velocidades reducidas; sin embargo, estas últimas condiciones pueden provocar la inestabilidad del sistema (Vela, 2001).

Este parámetro es uno de los más delicados ya que si no se tiene un buen control, puede causar inactividad, por lo que toma tiempo para su recuperación, incluso puede provocar muerte de las bacterias (Vela, 2001).

**c) Temperatura.-** Influye decisivamente en la actividad de los microorganismos. Los rangos de temperatura se clasifican en:

Rango Psicrófilico  $T < 15^{\circ}\text{C}$

Rango Mesófilico  $15 < T < 45^{\circ}\text{C}$

Rango Termófilico  $50 < T < 65^{\circ}\text{C}$

La mayoría de las bacterias metanogénicas son mesófilicas y tienen una temperatura óptima de  $35^{\circ}\text{C}$  (Vela, 2001).

**d) Sulfatos.-** La reducción de los sulfatos puede interferir con la metanogénesis debido a que las bacterias sulfato reductoras entran en competencia con las bacterias metanogénicas por el mismo sustrato para generar sulfuros. Los niveles inhibitorios de sulfuro están dentro de un rango de 100-800 mg/l de sulfuro disuelto. (Parkin et al, 1990; citados por Chen, Chenget al, 2007).

Los sulfuros ayudan a generar un ambiente anaerobio, por eso importante la presencia de este compuesto.

- e) **Aceites y Grasas.-** Valores muy superiores a 10mg/l(Vela, 2001) disminuyen la eficiencia del tratamiento, debido a que su biodegradabilidad es muy lenta.
- f) **Sólidos Totales y Sólidos Suspendidos.-** La relación entre los mismos permitirá saber la cantidad disuelta de materia orgánica en el efluente. Así se verá si la aplicación de un pretratamiento ayuda a la disminución de la materia orgánica del efluente (Vela, 2001).
- g) **Fósforo total y Nitrógeno Total.-** Conjuntamente con la DQO del efluente a tratar, son los tres factores esenciales para la estimulación del metabolismo anaerobio debido a la cantidad de nutrientes necesaria. La relación que se debe conservar entre el Carbono, Nitrógeno y Fósforo, como mínimo, en términos de DQO/N/P es 1000/7/1 (Vela, 2001).
- h) **Calcio y Magnesio.-** Una concentración óptima para la metanización del ácido acético es de 200mg Ca<sup>2+</sup>/l (Kugelman y McCarty citados por Chen et al, 2007) y de 720mg Mg<sup>2+</sup>/l (Ahring, Alatraste-Mondragon, Westermann y Mah citados por Chen et al, 2007). Concentraciones mayores pueden causar la precipitación severa de CaCO<sub>3</sub> o MgCO<sub>3</sub>, y además la disminución de la capacidad tampón del medio. Una solución es trabajar a valores de pH entre 6,0 y 6,2, debido a que la solubilidad del bicarbonato de calcio es relativamente alta.
- i) **Sodio.-**Este elemento a bajas concentraciones es esencial (McCarty citados por Chen et al, 2007),es beneficioso en el rango de 100-200 mg/l para el crecimiento de *mesófilos* anaerobios. Sin embargo altas concentraciones pueden afectar la actividad de los microorganismos e interferir con el metabolismo (Kugelman et al, 1964citado por Chen et al, 2007). Un primer estudio informó que las concentraciones de sodio que van desde 3500 hasta 5500 mg/l o moderadamente de 8000 mg/l son fuertemente inhibidores de metanógenos a temperaturas mesofílicas (McCarty citado por Chen et al, 2007).
- j) **Alcalinidad.-** Es necesario para evaluar si presenta una suficiente capacidad tampón que garantice la estabilidad del sistema, manteniendo el pH dentro del rango óptimo. Es necesario tener valores mayores a 1000 mg CaCO<sub>3</sub>/l.



### 3.6 NORMA PERUANA

Entiéndase por Valores Máximos Admisibles (VMA), como aquel valor de la concentración de elementos, sustancias o parámetros físico y/o químicos, que caracterizan a un efluente no doméstico que va a ser descargado a la red de alcantarillado sanitario, que al ser excedido causa daño inmediato o progresivo a las instalaciones, infraestructura sanitaria, maquinarias, equipos de los sistemas de alcantarillado y tratamiento de aguas residuales, y tiene influencias negativas en los procesos de tratamiento de las aguas residuales (DS N° 021-2009 -Vivienda).

Los parámetros a controlar aplicados a los efluentes NO DOMÉSTICOS según el DS N° 021-2009 (reglamento DS N° 010-2012 - Vivienda) pertenecen al anexo 1 y 2 que se muestra en el Cuadro5 y 6.

**Cuadro5: Anexo 1 de valores máximos admisibles**

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Expresión</b>	<b>Descarga al sistema de alcantarillado</b>
Demanda Bioquímica DBO5	mg/l	DBO5	500
Demanda Química de Oxígeno	mg/l	DQO	1000
Sólidos Suspendidos Totales	mg/l	SST	500
Aceites y Grasas	mg/l	A y G	100

Fuente: Ley 021-2009 - Vivienda

**Cuadro6: Anexo 2 de valores máximos admisibles (1)**

<b>Parámetros</b>	<b>Unidad</b>	<b>Expresión</b>	<b>Descargas al sistema de alcantarillado</b>
Aluminio	mg/l	Al	10
Arsénico	mg/l	As	0.5
Boro	mg/l	B	4
Cadmio	mg/l	Cd	0.2
Cianuro	mg/l	CN-	1
Cobre	mg/l	Cu	3
Cromo Hexavalente	mg/l	Cr <sup>-2</sup>	0.5
Cromo Total	mg/l	Cr	10
Manganeso	mg/l	Mn	4
Mercurio	mg/l	Hg	0.02
Níquel	mg/l	Ni	4
Plomo	mg/l	Pb	0.5
Sulfatos	mg/l	(SO <sub>4</sub> ) <sup>-2</sup>	500
Sulfuros	mg/l	S <sup>-2</sup>	5
Zinc	mg/l	Zn	10
Nitrógeno Amoniacal	mg/l	NH <sup>+4</sup>	80
pH (2)	Unidad	pH	6-9
Sólidos Sedimentables (2)	M/l/h	S.S.	8.5
Temperatura (2)	°C	T	<35

Fuente: Ley 021-2009 Vivienda

- (1) La aplicación de estos parámetros a cada actividad económica por proceso productivo, será precisada en el reglamento de la presente norma formando como referencia el código CIU. Aquellas actividades que no estén incluidas en este código, deberán cumplir con los parámetros indicados en el presente reglamento.
- (2) Estos parámetros, serán tomadas de muestras puntuales. El valor de los demás parámetros, serán determinados a partir del análisis de una muestra compuesta.

### 3.7 PRUEBA ESTADISTICA

En estadística, el Test de Shapiro–Wilk se usa para contrastar la normalidad de un conjunto de datos. Fue publicado en 1965 por Samuel Shapiro y Martin Wilk. Se considera uno de los test más potentes para el contraste de normalidad, sobre todo para muestras pequeñas ( $n < 30$ ).

Para determinar la prueba estadística, la evaluación de los resultados deberá cumplir con los siguientes requisitos: tener una distribución normal y tener características típicas de la distribución gráfica (forma acampanada), simétrica respecto a su media y asimétrica respecto al eje horizontal (Rubio, 2000). La evaluación de los datos permitirá identificar si se encuentran en el grupo de los paramétricos o no paramétricos.

Para realizar análisis paramétricos debe partirse de los siguientes supuestos:

1. La distribución poblacional de la variable dependiente es normal: el universo tiene una distribución normal.
2. El nivel de medición de la variable es por intervalos o razón.
3. Cuando dos o más poblaciones son estudiadas, tienen una varianza homogénea, las poblaciones en cuestión poseen una dispersión similar en sus distribuciones (Wiersma et al, 2008; citado por Hernández, 2010).

Para realizar análisis no paramétricos debe partirse de los siguientes supuestos:

1. La mayoría de estos análisis no requieren de presupuestos acerca de la forma de la distribución poblacional. Aceptan distribuciones no normales.
2. Las variables no necesariamente tienen que estar medidas en un nivel por intervalos o de razón; pueden analizar datos nominales u ordinales. De hecho, si se quieren aplicar análisis no paramétricos a datos con intervalos o razón, estos necesitan reunirse en categorías discretas y las variables categóricas (Wiersma et al, 2008; citado por Hernández, 2010).

La inferencia estadística es una prueba que analiza un grupo de valores normales o casi normales, además se ocupa de la interpretación de resultados y de las conclusiones a las que se

pueda llegar a partir de la información captada en una muestra aleatoria de una población (Rubio 2000).

El propósito de la inferencia estadística es alcanzar un mayor conocimiento acerca de los parámetros de una población, y a través de este conocimiento lograr una mejor comprensión sobre el comportamiento de una variable en estudio. Dado un conjunto de observaciones muestrales, el punto de partida para un análisis estadístico es la estimación de los parámetros que caracterizan el comportamiento de una variable en valuación (Rubio, 2000).

Los estimadores o valores estadísticos definen un procedimiento para resumir la información captada en una muestra con la fiabilidad de obtener una estimación o aproximación del valor de un parámetro. Los estimadores estadísticos como la media y variancia, son variables aleatorias cuyos valores dependen de las observaciones captadas de una muestra aleatoria. Dentro de los tipos tenemos a la estimación por intervalos de confianza, el cual viene a ser una estimación del valor de un parámetro mediante un conjunto de valores contenidos en un intervalo y el cual se obtiene a partir de una información muestral de modo tal que brinde una confianza establecida de contener al valor del parámetro (Rubio, 2000).

## IV. MATERIALES Y METODOS

La investigación se realizó en la Planta Piloto de Leche de la Universidad Nacional Agraria La Molina, para la cual se siguieron los siguientes pasos:

- 1) Se identificó el funcionamiento de las actividades productivas de la Planta de Leche.
- 2) Se evaluaron las características del efluente de la planta piloto de leche para definir el potencial de tratamiento anaerobio.
- 3) Se eligió el tipo de lodo que se utilizó como inóculo en el reactor, se tuvo como criterio, la mejor actividad microbiana obtenida y la disponibilidad de los lodos en evaluación. A la par se eligió el área donde se instaló el reactor y todos los componentes del sistema de tratamiento.
- 4) Se diseñó y construyó un Reactor UASB a nivel piloto, y los demás componentes que conformaron el sistema de tratamiento.
- 5) Se monitorearon parámetros que se controlaron en el arranque y operación del reactor UASB, esto sirvió en la planificación de la estrategia de arranque del reactor en función de la concentración de materia orgánica; se determinaron los criterios que se tomaron en cuenta para el paso de la etapa de arranque a la operación del Reactor.
- 6) Se evaluó la eficiencia de remoción de materia orgánica en la etapa de arranque y operación del reactor, esta evaluación se logró analizando los resultados obtenidos en las mediciones de entrada y salida de DQO.

## **4.1 ACTIVIDADES PRODUCTIVAS DE LA PLANTA PILOTO DE LECHE DE LA UNALM**

Para conocer cómo se desarrollaron las actividades productivas se entrevistó al Ingeniero de Producción de la Planta de Leche (Ing. José Mayta), complementaria a esta entrevista se solicitó información de registros de producción para conocer cantidades promedio por mes de leche que se utilizaron en la elaboración de los productos lácteos. La planta de leche tuvo tres actividades productivas importantes que fueron:

### **4.1.1 ELABORACIÓN DE QUESO**

Se realiza a partir de leche fresca con una acidez menor a 18° Dornic y 3% de grasa. La leche pasa por un proceso de pasteurización a una temperatura de 72 °C durante 15 segundos para destruir los gérmenes patógenos. Luego de la pasteurización la leche se lleva a una tina de incubación donde se reduce la temperatura a 35 °C (temperatura ideal para que se produzca la coagulación); se añade cloruro de calcio para fortalecer la coagulación en una proporción de 20 g por cada 100 litros de leche.

Para la coagulación se adicionan 2 gramos de cuajo (contiene enzimas coagulantes *Quimosina* o *Renina*) por cada 100 litros de leche, esta adición se realiza en constante agitación por un periodo de 2 a 3 minutos; luego se deja reposar de 45 a 60 minutos, en esta etapa ocurre el cambio de fase de líquido a un estado coloidal (consistencia similar al gel). La cuajada formada en la etapa anterior se corta en líneas verticales y horizontales para darle forma de cubo de 1 cm de lado, luego se deja en reposo por 5 minutos para adquirir consistencia y permitir su agitación sin fragmentarse.

En el primer desuerado se separa 1/3 del volumen inicial de la leche y se elimina al alcantarillado (eventualmente este volumen puede ser destinado para la elaboración de queso ricota). A los 2/3 del volumen que queda en la tina, se le agregó agua a una temperatura de 70 °C para elevar la temperatura a 38 °C, en constante agitación por 10 minutos. En el segundo desuerado es donde se elimina el líquido hasta alcanzar el nivel de la cuajada (coloide); este suero es vertido directamente a alcantarillado.

El saldo es la aplicación de sal en la cuajada con una relación de 1.4 a 1.6 % del volumen inicial de leche. La cuajada salada se coloca en moldes para darle la forma al producto final y se almacena a 1 a 4 °C. Finalmente existe una relación que por cada 100 litros de leche se produjo 17 kg de queso los 83 Kg restantes es suero (1 Kg  $\approx$  1 litro de leche) que como ya se mencionó en el párrafo anterior fue eliminado al alcantarillado.

#### **4.1.2 ELABORACIÓN DE YOGURT**

El volumen de leche se pasteuriza a una temperatura de 85°C por 10 minutos, luego se deja enfriar hasta 43 °C, a esta temperatura se inocula el cultivo láctico de bacterias para su incubación (*Streptococcus Salivarius* sub especie de *Termophilus*, *Lactobacillus Delbrueckii* sub especie de *Bulgaricus*). En la fermentación láctica el pH debe ser menor o igual a 4.6; luego se enfría hasta una temperatura menor a 20°C y se inicia el batido de yogurt con la adición de frutas, saborizantes y aromas. En el envasado se pierde aproximadamente un 1% de volumen producido el cual se elimina al alcantarillado, finalmente el yogurt se almacena a una temperatura de 4 a 5 °C.

#### **4.1.3 EMBOLSADO DE LECHE**

La leche fresca tiene una acidez menor a 18° Dornic, 3% de grasa y una densidad de 1.030 g/ml. La leche pasa por un proceso de pasteurización a una temperatura de 85 °C durante 10 segundos, para destruir los gérmenes patógenos. El volumen de leche es derivado a los tanques de enfriamiento hasta alcanzar una temperatura de 4 °C; finalmente ésta pasa a la máquina embasadora, la cual tiene una pérdida aproximadamente de 1% del volumen producido y que es posteriormente vertida al alcantarillado.

#### **4.2 CARACTERIZACIÓN DEL EFLUENTE DE LA PLANTA PILOTO DE LECHE**

Se caracterizó el efluente de la planta, cuyos componentes son de naturaleza orgánica (elaboración de queso, yogurt y embolsado de leche) e inorgánica (actividades de lavado de equipos con insumos químicos y limpieza de instalaciones). La caracterización se realizó para

definir los parámetros que se evaluaron durante la etapa de arranque y de operación. Algunos de los parámetros seleccionados, fueron analizados en un laboratorio particular (J. RAMON) certificado por INDECOPI y los parámetros restantes se analizaron en el laboratorio de Ingeniería Ambiental de la UNALM, como se indica en el Cuadro 7.

**Cuadro 7: Parámetros evaluados y metodología aplicada en los ensayos**

Parámetro	Unidad	Tipo de envase	Metodología	Laboratorio
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/l	Plástico	SM 5220-D	J. RAMON
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	mg/l	Plástico	SM 5210 B	J. RAMON
pH	Unidades de pH	Plástico	SM N° 4500 H <sup>+</sup> B (APHA)	Ing. Ambiental
Alcalinidad	mg CaCO <sub>3</sub> /l	Plástico	SM 2320-B	J. RAMON
Temperatura	°C	Plástico	SM N° 2550 B (APHA)	Ing. Ambiental
Sulfatos	mg/l	Plástico	EPA 9038 (1986)	J. RAMON
Aceites y Grasas	mg/l	Vidrio	SM 5520-B	J. RAMON
Sólidos Totales	mg/l	Plástico	SM N° 2540 D (APHA)	Ing. Ambiental
Sólidos Suspendidos Totales	mg/l	Plástico	SM N° 2540 D (APHA)	Ing. Ambiental
Sólidos volátiles	mg/l	Plástico	SM N° 2540 G (APHA)	Ing. Ambiental
Sólidos Suspendidos Volátiles	mg/l	Plástico	SM N° 2540 E (APHA)	Ing. Ambiental
Nitrógeno kjeldahl	mg/l	Plástico	OM N° 920.105 N (AOAC)	Ing. Ambiental y J. RAMON
Calcio *	mg/l	Plástico	EPA200.7(1994)	J. RAMON
Magnesio *	mg/l	Plástico	EPA200.7(1994)	J. RAMON
Sodio *	mg/l	Plástico	EPA200.7(1994)	J. RAMON
Fósforo Total *	mg/l	Plástico	EPA200.7(1994)	J. RAMON

Fuente: Elaboración Propia

\* Componentes evaluados por el análisis de Barrido ICP óptico de metales EPA200.7(1994).

EPA: Agencia de Protección Ambiental U.S.

SM: Método Estándar

OM: Métodos Oficiales

APHA: Asociación Americana de Salud Pública



Los parámetros fósforo, calcio, magnesio y sodio estuvieron incluidos conjuntamente con otros 28 metales en el análisis de Barrido ICP Óptico en Metales (Ver Anexo 1 y 2). Se tomó una muestra al inicio del arranque y una muestra al inicio de la operación del Reactor. Los parámetros monitoreados se muestran en el Cuadro 8.

**Cuadro8: Metodología de toma de efluente de la planta de leche**

<b>Parámetros</b>	<b>N° de Muestra en el Arranque</b>	<b>N° de Muestra en la Operación</b>
DQO	X	X
DBO	X	
pH	X	X
Alcalinidad	X	
Temperatura	X	X
Sulfatos	X	
Aceites y Grasas	X	
Sólidos Totales	X	X
Sólidos Suspendidos Totales	X	X
Sólidos volátiles	X	X
Sólidos Suspendidos Volátiles	X	X
Nitrógeno Kjeldahl	X	X
Calcio *	X	X
Magnesio *	X	X
Sodio *	X	X
Fósforo Total *	X	X

Fuente: Elaboración Propia

\* Componentes analizados por el método de laboratorio de Barrido ICP óptico de metales EPA200.7(1994).

El monitoreo se realizó a lo largo de un día de producción (entre la 8:00y 13:00 horas), para ello se tomó una muestra compuesta del efluente en intervalos de media hora. La muestra se obtuvo de la poza de vertimiento de la planta piloto de leche.

### **4.3 DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMAS DE TRATAMIENTO EN LA PLANTA DE LECHE**

#### **4.3.1 DISEÑO DEL REACTOR UASB**

El reactor UASB se construyó cumpliendo las características hidráulicas de diseño, los elementos que se consideraron fueron:

Tiempo de Retención Hidráulica (TRH) que se calculó en función del caudal y del volumen del reactor. Se expresó con la siguiente fórmula:

$$TRH = \frac{VR}{Q}$$

Donde:

VR: Volumen del Reactor (L)

Q: Caudal (L/día)

La Velocidad de Carga Orgánica (VCO) se determinó en función del caudal, de la DQO y del volumen del reactor. Se calculó con la siguiente formula:

$$VCO = \frac{DQO \times Q}{VR} = LR \times CM$$

Donde:

DQO: Demanda Química de Oxígeno (mg/l)

Q: Caudal (l/día)

VR: Volumen de Reactor (litros)

LR: Concentración de Lodo del Reactor (g SV/l)

CM: Carga Másica (g DQO/g SV·día)

Concentración del lodo del Reactor (g SV/l):

$$LR = \frac{SV \times VL}{VR}$$

Donde:

LR: Concentración de Lodo del Reactor (g SV/l)

CM: Carga Másica (g DQO/g SV·día)

VR: Volumen de Reactor (litros)

VL: Volumen de Lodo(litros)

Tasa de Recirculación (%):

$$TR = \frac{Qr}{Qa}$$

Donde:

Qr: Caudal de Recirculación (m<sup>3</sup>/h)

Qa: Caudal de Alimentación (m<sup>3</sup>/h)

Carga Hidráulica Aplicada (m<sup>3</sup>/h):

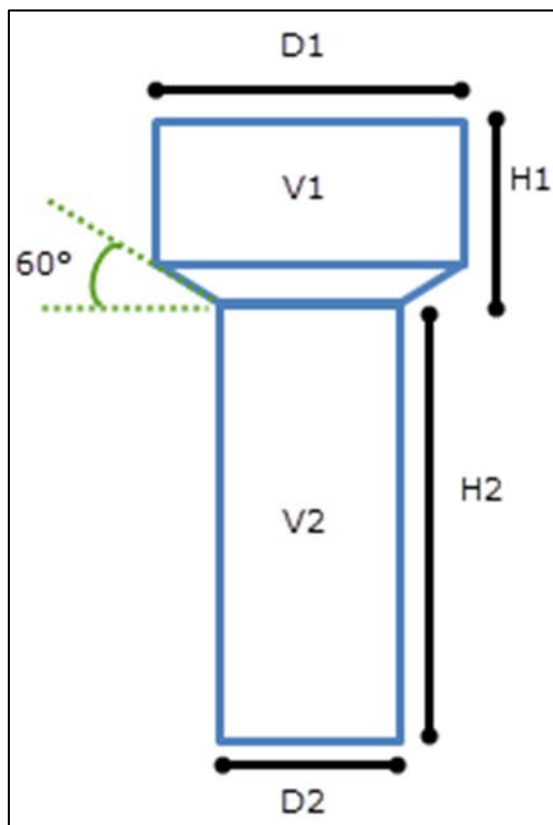
$$CHA = Qa + Qr$$

Donde:

Qr: Caudal de Recirculación (m<sup>3</sup>/h)

Qa: Caudal de Alimentación (m<sup>3</sup>/h)

Las dimensiones y características del reactor UASB se muestran en la Figura5.



**Figura 5: Dimensiones del Reactor**

Fuente: Elaboración Propia

Donde:

Diámetro de Sedimentador(D1) = 0.46 m.

Diámetro Cuerpo de Reactor (D2) = 0.355 m.

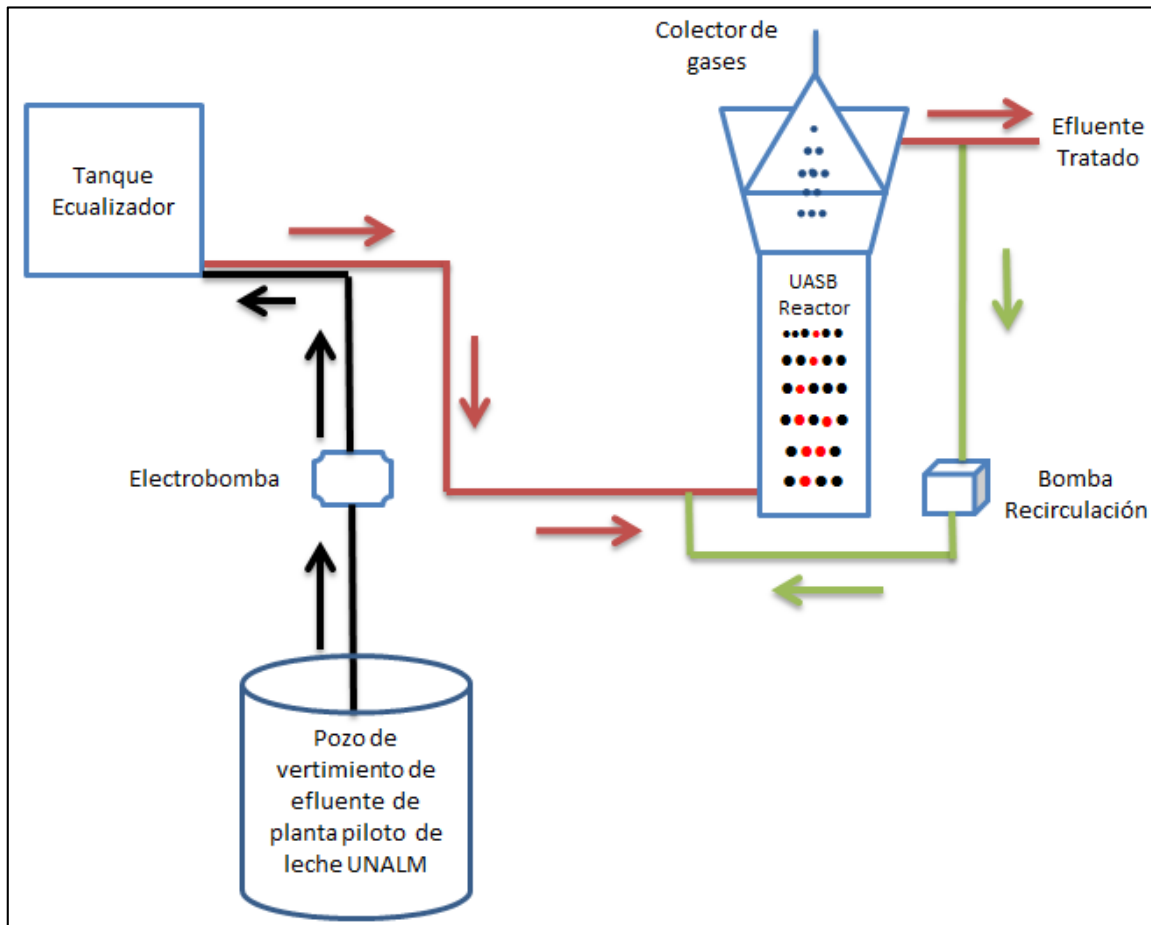
Altura Sedimentador (H1) = 0.3 m.

Altura de Cuerpo de Reactor (H2) = 1.51 m.

Volumen de Sedimentador (V1) = 0.04985 m<sup>3</sup>.

Volumen de Cuerpo de Reactor (V2) = 0.14945 m<sup>3</sup>.

En la Figura 6 se muestra el esquema del proceso de tratamiento planteado.



**Figura 6: Distribución de las conexiones del sistema de tratamiento**

Fuente: Elaboración Propia

#### 4.3.2 CONSTRUCCIÓN DEL REACTOR:

Se acoplaron 2 tuberías una de 14 y otra de 18 pulgadas de diámetro para formar el cuerpo del reactor (Ver Figura 7). La tubería de 18 pulgadas de diámetro se situó en la parte superior para cumplir la función de sedimentador y facilitar la colección del biogás.



**Figura 7: Reactor UASB**

Fuente: Elaboración Propia

#### **4.3.3 CONEXIONES INTERNAS DE ALIMENTACIÓN**

Se instalaron 2 entradas por la parte inferior del reactor para el ingreso del afluente a una altura de 15 cm. Se utilizaron tuberías de 1 pulgada perforadas a todo lo largo del tubo con agujeros de 0.01 m de diámetro para distribuir el líquido afluente en la base del reactor. Para evitar taponamientos, los agujeros fueron orientados hacia la base inferior del reactor (Ver Figura 8).



**Figura 8: Vista de la base del reactor en posición invertida**

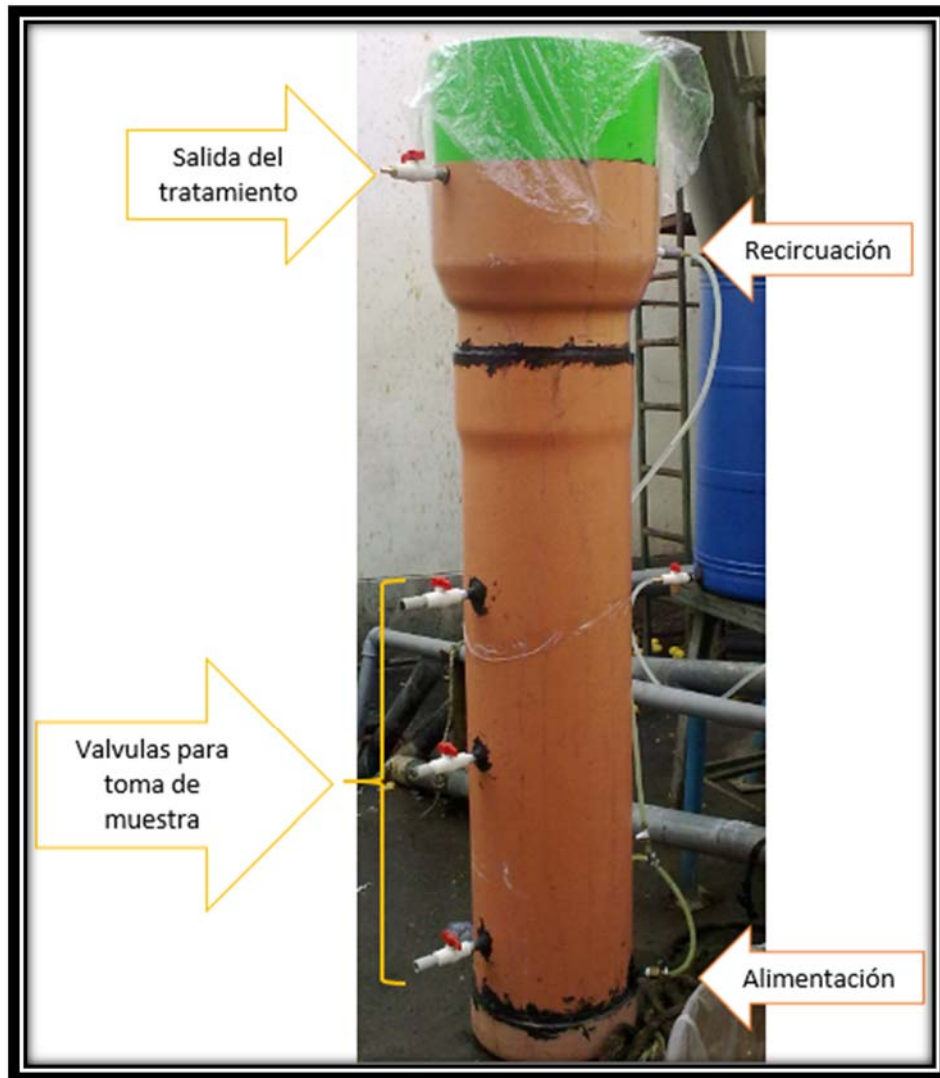
Fuente. Elaboración Propia

#### **4.3.4 ALIMENTACIÓN, RECIRCULACION Y MUESTREO DE LODO**

Se instalaron válvulas de globo para diferentes controles:

- a) La primera válvula se instaló para evacuar el efluente tratado a la salida del reactor una altura de 170 cm.
- b) Se instalaron además 3 válvulas a lo largo del reactor para la colección de muestra y desagüe del lodo a alturas de 30, 70 y 100 cm.
- c) Se instalaron tuberías para la recirculación del efluente y se ubicaron a una altura de 165 cm en la parte posterior del reactor. Este efluente fue reinyectado al proceso por las tuberías de alimentación del reactor.

En la Figura 9 se puede observar la distribución de las salidas y entradas en el reactor UASB.



**Figura 9: Vista del reactor UASB y ubicación de válvulas**

Fuente: Elaboración Propia

#### **4.3.5 IMPLEMENTACION DEL TANQUE ECUALIZADOR, DE LAS CONEXIONES DEL SISTEMA Y DEL COLECTOR DE GASES**

Se instaló un tanque ecualizador de 600 litros para almacenar el efluente de la planta de leche; este se ubicó en el techo de la planta a una altura de 4.5 m, para aprovechar la presión gravitacional al momento de la alimentación. Es importante mencionar que en este tanque se realizó el control de pH.



Las conexiones que se realizaron de la siguiente manera:

- a) La primera conexión fue realizada para extraer el efluente del tanque de vertimientos de la planta de leche, ubicada aproximadamente a 3 metros por debajo del nivel de suelo; desde aquí se elevó aproximadamente 4 metros hacia el tanque de ecualización, usando una bomba de 0.5 HP.
- b) Se instalaron válvulas de globo para controlar el flujo del efluente hacia el ecualizador y para la alimentación hacia el reactor.
- c) Se utilizaron mangueras plásticas siliconadas para alimentar el reactor; con un diámetro de  $\frac{1}{4}$  de pulgada, en esta manguera se instaló la válvula de regulación de flujo para la alimentación del reactor.

Para la colección de gases se construyó un colector con forma de embudo y se instaló una válvula en la parte superior para poder acoplar el equipo de medición de gases y monitorear la calidad del gas producido (Ver Figura 10).



**Figura 10: Colector de gases**

Fuente: Elaboración Propia

#### **4.3.6 INSTALACIÓN DE LA ZONA DE DISTRIBUCIÓN DE FLUJO**

En la base del reactor se colocó una cama de piedras para mejorar la distribución del flujo de entrada y evitar que se obstruyan los orificios de la tubería de ingreso.

Se utilizaron piedras de un diámetro aproximado de 7 cm en la base y de forma progresiva se fueron colocando otras de menor tamaño hasta alcanzar unas de 1 cm de diámetro en la parte superior, la cama de piedras tuvo una altura aproximada de 30 cm. Finalmente sobre esta cama de piedras se colocó el lodo anaerobio.

#### **4.3.7 MONITOREO DEL AFLUENTE Y EFLUENTE DURANTE EL TIEMPO DE ARRANQUE Y OPERACIÓN DEL REACTOR**

Se realizó al inicio de la etapa de arranque y operación del reactor, se tomaron muestras compuestas (MC) para determinar su composición. Para monitorear el comportamiento del

reactor en ambas etapas del tratamiento, se tomaron muestras simples diarias (MS, Diarias), muestras simples semanales (MS, Semanales), muestras compuestas semanales (MC, Semanales) y muestras compuestas diarias (MC, Diarias), en un rango de tiempo de 8: 00 a 13:00 horas, la distribución de muestras se observan en el Cuadro 9.

**Cuadro9: Metodología de toma de muestra por etapa**

PARÁMETRO	ARRANQUE			OPERACIÓN		
	Entrada PPL	Entrada UASB	Salida UASB	Entrada PPL	Entrada UASB	Salida UASB
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	MC	MS,S	MS,S	MC	MC,S	MS,S
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	MC					
pH	MC	MS,D	MS,D	MC	MC,D	MS,D
Alcalinidad	MC			MC		
Temperatura	MC	MS,D	MS,D	MC	MC,D	MS,D
Sulfatos	MC					
Aceites y Grasas	MC					
Sólidos Totales	MC			MC		
Sólidos Suspendedos Totales	MC			MC		
Sólidos volátiles	MC			MC		
Sólidos Suspendedos Volátiles	MC			MC		
Nitrógeno Kjeldahl	MC			MC		
Calcio *	MC			MC		
Magnesio *	MC			MC		
Sodio *	MC			MC		
Fósforo Total *	MC			MC		

Fuente: Elaboración Propia

MC: Muestra Compuesta - MS: Muestra Simple – D: Diaria – S: Semanal

PPL: Planta Piloto de Leche

\* Componentes analizados por el análisis de Barrido ICP óptico de metales EPA200.7(1994).

#### **4.4 ELECCIÓN DEL INÓCULO PARA EL REACTOR UASB**

Se solicitó la donación de lodo anaerobio del reactor UASB de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas de la Universidad de Ingeniería (CITRAR), la elección de este lodo fue por su inmediata disponibilidad.

Ya iniciada la etapa de arranque del reactor se añadieron dos volúmenes de lodos provenientes de donaciones de los reactores de las empresas BACKUS y AMBEV (cerveceras). Se determinó la actividad metanogénica de cada lodo, la descripción de esta prueba se detalla en el acápite 3.4.1, de la revisión de literatura.

#### **4.5 ARRANQUE DEL REACTOR UASB**

Para dar inicio a la etapa de arranque del reactor fue necesario caracterizar el efluente de la planta piloto con una muestra compuesta (MC). En esta etapa fue necesario dotar al reactor de un afluente cuyo contenido tuviera poca concentración de químicos (limpieza de los equipos y ambientes entre otros), pero presencia de materia orgánica (más biodegradable).

Para darle esta condición a la alimentación se tomó una muestra simple alrededor de las 10:00 horas, se eligió este horario porque iniciaba el vertimiento del efluente de la planta de leche generado por la elaboración de queso (suero queso), embolsado de leche, y embotellado de yogurt; esta muestra simple fue colectada y almacenada en el tanque equalizador del sistema de tratamiento para la alimentación del reactor.

Esta estrategia se planteó para que las bacterias tengan una buena adaptación y no se vean afectadas (Ver Cuadro 10). En la etapa de arranque se monitorearon los siguientes parámetros.

**Cuadro10: Monitoreo de parámetros para la etapa de arranque**

<b>Parámetro</b>	<b>Diaria</b>	<b>Semanal</b>	<b>Descripción</b>
DQO		X	Las muestras se tomaron en la entrada y salida del reactor durante la semana, regularmente los lunes y viernes.
pH	X		Se monitoré todos los días de lunes a viernes.
Caudal	X		Se monitoré y reajusté todos los días de lunes a viernes. El reajuste se hizo porque se observó el taponamiento de la válvula de ingreso debido a que no se instalaron unidades de pretratamiento antes del reactor.

Fuente: Elaboración Propia

#### **4.6 OPERACIÓN DEL REACTOR UASB**

Se utilizó el flujo normal del efluente de la planta de leche, incluyendo el agua de limpieza que incorpora el uso de soda caustica (NaOH) para la limpieza de equipos. Para darle esta condición a la alimentación se tomó una muestra compuesta cada hora por un rango de tiempo de las 8:00 a 13:00 horas (Ver Cuadro 11). En la etapa de operación se monitorearon los siguientes parámetros:

**Cuadro 11: Monitoreo de parámetros para la etapa de operación**

<b>Parámetro</b>	<b>Diaria</b>	<b>Semanal</b>	<b>Descripción</b>
DQO		X	Las muestras se tomaron a la entrada y salida del reactor, regularmente los lunes y viernes.
pH	X		Se monitoré todos los días de lunes a viernes.
Caudal	X		Se monitoré y se reajusté todos los días de lunes a viernes. Por la misma condición observada durante la etapa de arranque.

Fuente: Elaboración Propia

Con fines de conocer la composición del biogás se realizaron 2 mediciones en la etapa de operación haciendo uso de un equipo muestreador de gases LANTEC, esto para leer las concentraciones de metano, oxígeno y dióxido de carbono (Ver Figura 11).



**Figura 11: Muestreador de Gases**

Fuente: Elaboración Propia

Los resultados de la DQO, del afluente y del efluente, obtenidos durante la etapa de arranque y tratamiento del reactor UASB permitieron determinar la eficiencia de trabajo, la cual se calculó con la siguiente formula:

$$\text{Eficiencia} = \frac{\text{DQO entrada} - \text{DQO salida}}{\text{DQO entrada}} \times 100$$

## 4.7 INSTRUMENTOS DE COLECTA DE DATOS

### 4.7.1 MATERIALES DE MUESTREO INICIAL (CARACTERIZACIÓN)

La muestra colectada de forma compuesta se enviál laboratorio J. RAMON para su análisis.

- 10 Botellas plásticas rotuladas de 1litro con tapa y contratapa.
- Mandil, botas de jebe, guantes y mascarilla.
- Preservante para DQO: Ácido sulfúrico.
- Cooler
- Paquetes de hielo

#### **4.7.2 MATERIALES PARA MUESTREO DIARIO**

- 1 Botellade plástico de 0.5 litros
- Mandil, botas de jebe, guantes y mascarilla.
- Preservante para DQO: Ácido sulfúrico.

#### **4.7.3MATERIALES PARA ANÁLISIS DE DQO, FÓSFORO TOTAL, ALCALINIDAD, SST Y STEN LABORATORIO**

- Reactivos viales para DQO de rango alto (0 – 1500 mg.)
- Persulfato de Potasio
- Hidróxido de sodio
- Fenolftaleína
- Naranja de metilo
- Filtros de fibra de vidrio de Porosidad : 1  $\mu\text{m}$  y Dimensión : 47 mm (SST)
- Cápsulas de porcelana
- Pinzas
- Pipetas, bombilla
- Fiolas
- Frascos erlemeyer de 150mL
- Agua destilada
- Ac clorhídrico 5N (HCl)

#### **4.7.4 MATERIALES PARA NITROGENO KJELDAHL**

- Ácido Clorhídrico Concentrado
- Ácido Sulfúrico Concentrado
- Hidróxido de Sodio
- Ácido Bórico
- Fenolftaleína
- Indicador Mixto de Rojo de Metilo y Verde de Bromocresol
- Pastilla Kjeldahl (reemplazado por sulfato de cobre y sulfato de potasio)
- Mortero

#### **4.7.5 MATERIALES PARA CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DEL REACTOR UASB**

##### **CONSTRUCCIÓN:**

- Tuberías de desagüe de 18 y 14 pulgadas (cuerpo del reactor)
- Tuberías rectas y codos de 1, ½ y ¼ pulgadas (instalaciones internas y externas del sistema)
- Mangueras siliconadas de ¼ de pulgada.
- Válvulas de 1, ½ y ¼, pulgadas.
- Embudo de 18 pulgadas.
- Tanque de agua de 600 Litros.
- Pegamento cemento de contacto.
- Silicona negra
- Roscas de bronce de 1, ½, pulgadas
- Piedras canto rodado de 1 a 7 cm de diámetro.

##### **IMPLEMENTACIÓN:**

- Reactor UASB
- Lodo granular
- Cantos rodados de diámetro alrededor de 1, 2 y 3 cm.
- Tanque de alimentación de un volumen de 600 Litros.
- Manguera de silicona y válvulas metálicas de ¼ de pulgada de diámetro.
- Tuberías y válvulas de PET de 1 pulgada de diámetro.
- Efluente de la Planta Piloto de leche de la UNALM.
- Bomba de agua de una capacidad de 0.5 HP



#### **4.7.6 EQUIPOS PARA MUESTREO DIARIO**

- Potenciómetro portátil de campo (pH y T). Marca HACH

#### **4.7.7 EQUIPOS PARA ANÁLISIS EN LABORATORIO DE ALCALINIDAD, DQO, SST Y ST**

##### **Alcalinidad:**

- Agitador magnético. Marca CAT
- Potenciómetro de laboratorio (pH y T). Marca HACH

##### **DQO y Fósforo Total:**

- Reactor de DQO que opera a 150+2°C. Marca HACH
- Espectrofotómetro. Marca ThermoSpe

##### **SV y ST:**

- Mufla. Marca Darlish
- Equipo de filtración. Marca Vacuubrand
- Estufa para secado. Marca Memmert
- Desecador, con indicador instrumental. Marca VWR-USA
- Balanza analítica. Marca SARTLA

#### **4.7.8 EQUIPOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA ACTIVIDAD METANOGENICA DEL EFLUENTE**

- Agitador magnético. Marca CAT
- Potenciómetro de laboratorio (pH y T). Marca HACH
- Balanza analítica. Marca SARTLA
- Ácido Acético
- Hidróxido de Sodio diluido en agua destilada (25 g NaOH / L)
- Bicarbonato de sodio
- Sulfuro de sodio
- 2 Frascos de 500 ml
- Un soporte universal
- Mangueritas de caucho de 2 mm de diámetro
- 3 Corchos de jebe

#### **4.7.9 EQUIPO PARA LA RECIRCULACIÓN DEL REACTOR UASB**

- Bomba peristáltica. Marca Cole Parmer.

#### **4.7.10 EQUIPO PARA DETERMINAR LA COMPOSICIÓN DE BIOGAS**

- Muestreador de gases LANDTEC

#### **4.8 PROCEDIMIENTOS DE ANÁLISIS DE DATOS**

Para determinar la confiabilidad de los resultados obtenidos se hizo uso de la prueba estadística Shapiro-Wilk, de este modo se pudo determinar el comportamiento y la normalidad de los datos obtenidos en función de la probabilidad. Para este análisis se usó el Paquete Estadístico para las Ciencias Sociales (SPSS).

De otro lado los resultados también fueron evaluados por Inferencias Estadísticas, para saber si éstos, brindan suficiente evidencia al ser asociados a la población de donde se extrajo la muestra y si se tuvo resultados similares a los obtenidos con los datos muestrales.

Las hipótesis estadísticas planteadas fueron las siguientes:

Ho: La eficiencia del tratamiento es menor o igual de 70%.

H1: La eficiencia del tratamiento es mayor de 70%.

Los intervalos de confianza se eligieron para evaluar cuando la varianza es conocida:

$$LIC(\mu) = \bar{x} - Z_{tab}\sigma_{\bar{x}}$$

$$LSC(\mu) = \bar{x} + Z_{tab}\sigma_{\bar{x}}$$

Donde:

LIC ( $\mu$ ): Límite Inferior de Confianza

LSC ( $\mu$ ): Límite Superior de Confianza

$$Z_{tab} = Z \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right)$$

$$\alpha=0.05 \text{ y } \sigma_{\bar{x}n} = \sqrt{\frac{\sigma_A^2}{n_B}}$$

## V. RESULTADOS Y DISCUSIONES

### 5.1 DESCRIPCIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE DERIVADOS LÁCTEOS EN LA PLANTA DE LECHE UNALM.

En el Cuadro 12 se muestran los volúmenes promedio de leche que se utilizaron mensualmente para la elaboración de queso, yogurt y leche; además del volumen de efluentes generados.

**Cuadro 12: Volumen mensual de leche por proceso y generación de efluente**

Etapa	Meses	Queso		Embolsado Leche		Yogurt	
		Vol. Leche (litros)	Efluente (litros)	Vol. Leche (litros)	Efluente (litros)	Vol. Leche (litros)	Efluente (litros)
arranque	jul-12	3840	3187.2	31163	311.63	21053	210.53
arranque	ago-12	3030	2514.9	32782	327.82	15033	150.33
arranque	sep-12	840	697.2	36615	366.15	4200	42
arranque	oct-12	4000	3320	36320	363.2	5900	59
arranque	nov-12	-	-	37953	379.53	280	2.8
arranque	dic-12	-	-	46612	466.12	-	-
arranque	ene-13	5340	4432.2	15735	157.35	12141	121.41
operación	feb-13	2340	1942.2	16688	166.88	6860	68.6
operación	mar-13	1000	830	27885	278.85	4340	43.4
operación	abr-13	5300	4399	21278	212.78	12670	126.7
operación	may-13	6120	5079.6	22795	227.95	16420	164.2

Fuente: Elaboración Propia

## 5.2 COMPOSICIÓN DEL EFLUENTE DE LA PLANTA PILOTO DE LECHE

El efluente de la planta piloto de leche fue caracterizado en dos momentos, el primero fue al iniciar la etapa de arranque y el segundo al iniciar la etapa de operación, los resultados se muestran en el Cuadro 13.

**Cuadro13: Caracterización del efluente de la planta de leche al inicio de la etapa de arranque y operación del reactor**

Parámetro	Unidad	Arranque	Operación
DQO	mg O2/l	547	1420
DBO	mg O2/l	300	-
pH	unidades de pH	7.04	7.1
Alcalinidad	mg CaCO3/l	196	180
Temperatura	°C	22	22
Sulfatos	mg/l	488.4	-
Aceites y Grasas	mg/l	< 1	-
Sólidos Totales	mg/l	52528	6088
Sólidos Suspendidos Totales	mg/l	35450	833.3
Sólidos volátiles	mg/l	41804	5550
Sólidos Suspendidos Volátiles	mg/l	29100	766.6
Nitrógeno Kjeldahl	mg/l	22.23	90.72
Calcio *	mg/l	266.6	286.6
Magnesio *	mg/l	45.78	50.21
Sodio *	mg/l	263.4	451.7
Fósforo Total *	mg/l	3.927	13.88

Fuente: Ensayos realizados por los Laboratorio de Ing. Ambiental y J Ramon.

\* Componentes analizados por el análisis de Barrido ICP óptico de metales EPA200.7 (1994).

Los valores de la caracterización al inicio de la etapa de arranque fueron similares a los de la etapa de operación del reactor, excepto por los Sólidos Totales (ST), Sólidos Suspendidos Totales (SST), Sólidos Volátiles (SV), Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV) y la Demanda Química de Oxígeno (DQO). La diferencia en los sólidos se presentó por que durante la etapa de operación solo se produjo yogurt, mientras que en la etapa de arranque se produjo además queso y leche embolsada. En la etapa de arranque los parámetros DQO, DBO, A y G, Sulfatos y temperatura se encuentra por debajo de los valores máximos admisibles a comparación del SST y el magnesio; en la etapa de operación los parámetros A y G, Sulfatos y temperatura se encuentran por debajo de los valores máximos admisibles a comparación del DQO, SST y el magnesio. Sobre la DQO se presume tuvo un menor valor en la etapa de arranque por tener una mayor dilución de químicos. Los resultados de la actividad metanogénica realizada a los 3 inóculos que se utilizaron en el tratamiento se muestran en el Cuadro 14.

**Cuadro 14: Actividad Metanogénica de Biomasa**

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Actividad Lodo UNI	0.05	Kg DQO/(Kg SV·día)
Actividad Lodo BACKUS	0.29	Kg DQO/(Kg SV·día)
Actividad Lodo AMBEV	0.30	Kg DQO/(Kg SV·día)

Fuente: Elaboración Propia

### **5.3 REACTOR UASB**

#### **5.3.1 DISEÑO, PUESTA EN MARCHA Y OPERACIÓN DEL REACTOR UASB**

Se construyó un reactor UASB cumpliendo con las características hidráulicas de diseño y además según la norma técnica de edificación OS.090 para tratamiento de aguas residuales, donde se menciona que para los estudios de tratabilidad para plantas a escala de laboratorio, deberá tener una capacidad de tratamiento de alrededor de 40 l/día. En esta investigación la capacidad de tratamiento promedio fue de 75.3 l/día. Para el diseño no se tomó como guía los parámetros de la normativa por ser poco específica la cual cataloga a todos los efluentes en una misma categoría y no en función de su complejidad de tratamiento. En el Cuadro 15 se comparó algunos parámetros obtenidos en la investigación con la de la OS.090.

**Cuadro 15: Reactor UASB vs NT OS.090**

<b>PARÁMETRO</b>	<b>VALORES EN EL ARRANQUE</b>	<b>NT OS.090</b>	<b>UNIDAD</b>
Concentración de Lodo del Reactor (LR)	1.756	-	g SV/l
Velocidad Ascensional Promedio	0.191	1	m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> ·h)
Sólidos Volátiles Lodo (Concentración de Biomasa)	4.508	-	g SV/l
VCO o Carga de Diseño	0.10729	15 - 20	kg DQO/(m <sup>3</sup> ·día)
TRH	2.8	-	días
Caudal Operación Promedio	0.0753	-	m <sup>3</sup> /día
Concentración de Sustrato Esperado (CS) o Afluente	232.426	-	mg DQO/l
Volumen del Inóculo	77.64	-	litros
Actividad Inóculo	0.05	-	kg DQO/(Kg SV·día)

Fuente: Elaboración Propia

Como se muestra en el Cuadro 15, la velocidad ascensional obtenida tiene un valor menor a la que pide la norma, esto es debido al caudal promedio de arranque de 0.0753 m<sup>3</sup>/día, el mismo que no se podría incrementar ya que el inóculo tiene una actividad de 0.05 Kg DQO/(g SV·día) y no soportaría una carga másica elevada. Además la tasa de recirculación obtenida está dada en función del caudal de recirculación (0.01578 m<sup>3</sup>/h) y del caudal de alimentación promedio (0.00314 m<sup>3</sup>/h), obteniendo un valor de 5.3 y una carga hidráulica aplicada de 0.01892 m<sup>3</sup>/h.

Otra alternativa fue de aumentar el flujo de la recirculación, no logrando esta intención ya que el flujo máximo que se pudo conseguir con la bomba de recirculación fue de 0.01578 m<sup>3</sup>/h. Respecto a la VCO, no se pudo trabajar en el rango de 15 - 20 kg DQO/(m<sup>3</sup>·día) propuestos por la NT OS.090 por la baja actividad microbiana del inóculo, el cual se convirtió en una limitante para poder alcanzar estos valores. Además las condiciones del efluente no fueron las más ideales por la tendencia a la acidificación a causa de la presencia de grasas y químicos presentes producto de las actividades de limpieza.

En el Cuadro 16 se puede observar el incremento de los sólidos volátiles esto producto de la adaptación del lodo afluente; además este incremento afecta a la carga másica del reactor disminuyendo su valor por ser inversamente proporcional.

**Cuadro 16: Evolución del inóculo durante el tiempo de tratamiento**

PARÁMETRO	UNIDAD	03/07/2012	19/10/2012	18/03/2013
Sólidos Volátiles Inóculo (Concentración de Biomasa)	g SV/l	4.508	13.036	18.627
Carga Másica de Alimentación	kg DQO/(Kg SV·día)	0.060 – 0.517	0.034 – 0.227	0.030 – 0.204

Fuente: Elaboración Propia

### 5.3.2 MONITOREO DE PARAMETROS DE CALIDAD DEL EFLUENTE

Las concentraciones de la alimentación variaron entre los 284 mg/l a 5010 mg/l de DQO, cuyo valores promedios en las etapas de arranque y operación fueron de 1156.38 mg/l y de 2699.85 mg/l respectivamente, como se muestra en el Cuadro 17.

Se trabajó con TRH que variaron de 1.6 a 3.4 días, en promedio la mayor parte de la investigación se mantuvo en 2.7 días, a diferencia del trabajo realizado Kalyuzhnyi et al, 1996 (citado por Liviac, 2013), quien trabajó con valores iniciales de 10.5 días, hasta reducirlos a 2.5 días. Esto se debió a la limitación de los materiales con que se contaba para lograr TRH altos (Ver Figura 12).

La eficiencia del tratamiento en el arranque tuvo valores constantes superiores al 70%, un indicativo para finalizar la etapa de arranque e iniciar la etapa de operación fue el obtener 4 valores de eficiencia superiores al 83%, este comportamiento indica que las bacterias del inóculo se aclimataron tal como se muestra en el Cuadro 17. Otro indicador que describió la aclimatación del inóculo fue la carga másica (CM), la cual demuestra mantener eficiencias promedio mayores al 70% aun en el incremento de la concentración del sustrato de alimentación (CS) o DQO de entrada y la de los sólidos volátiles del inóculo, tal como se muestra en el Cuadro 18. La carga másica del lodo tuvo una reducción en su valor promedio de 0.083, esto porque en ese rango de fecha se agregó los volúmenes de lodo de Backus y Ambev.



**Cuadro 17: Valores de DQO de afluente, efluente y eficiencia de tratamiento del reactor UASB en el periodo 2012 - 2013**

ETAPA	FECHA	DQO AFLUENTE (mg/l)	DQO EFLUENTE (mg/l)	EF. TRAT	ETAPA	FECHA	DQO AFLUENTE (mg/l)	DQO EFLUENTE (mg/l)	EF. TRAT	
ARRANQUE	03/07	1070	378	64.7	OPERACIÓN	28/01	1602	289	82.0	
	09/07	1612	338	79.0		04/02	1503	228	84.8	
	12/07	1338	149	88.9		13/02	1326	199	85.0	
	16/07	1725	866	49.8		18/02	3912	373	90.5	
	20/07	1035	189	81.7		04/03	3460	226	93.5	
	01/08	408	59	85.5		18/03	4988	898	82.0	
	03/08	319	84	73.7		02/04	4296	2005	53.3	
	07/08	284	73	74.3		08/04	3800	1666	56.2	
	16/08	472	179	62.1		15/04	951	266	72.0	
	24/08	700	234	66.6		22/04	2752	605	78.0	
	27/08	622	166	73.3		29/04	1220	305	75.0	
	31/08	1066	291	72.7		06/05	4104	1200	70.8	
	03/09	584	117	80.0		20/05	1320	228	82.7	
	07/09	310	103	66.8		27/05	2564	396	84.6	
	10/09	810	159	80.4						
	14/09	704	224	68.2						
	18/09	436	255	41.5						
	05/10	540	190	64.8						
	11/10	588	76	87.1						
	15/10	566	119	79.0						
	19/10	856	191	77.7						
	26/10	864	224	74.1						
	30/10	898	275	69.4						
	05/11	1742	269	84.6						
	12/11	878	249	71.6						
	16/11	1944	230	88.2						
	21/11	570	200	64.9						
	23/11	1470	675	54.1						
	03/12	730	182.5	75.0						
	10/12	1738	494	71.6						
	18/12	3339	566	83.0						
	26/12	5010	154	96.9						
04/01	1821	238	86.9							
22/01	2268	231	89.8							

Fuente: Elaboración Propia

**Cuadro 18: Evolución de sólidos volátiles, DQO entrada y carga másica**

<b>PARÁMETRO</b>	<b>03/07/12 - 15/10/12</b>	<b>19/07/12 - 13/02/13</b>	<b>18/02/13 - 15/05/13</b>
Sólidos Volátiles (g SV/l)	4.508	13.036	18.627
DQO Entrada Promedio (mg/l)	759.45	1679.64	3033.36
Carga Másica Promedio (Kg DQO/Kg SV·día)	0.201	0.083	0.104

Fuente: Elaboración Propia

Se tomó como referencia valores de VCO empleados por Kalyuzhnyi et al, 1996 (citado por Liviác, 2013), quienes trabajaron con valores menores de 3 Kg DQO/m<sup>3</sup>·día, en esta investigación se intentó aproximar a este valor, trabajando en un rango de 0.11 a 1.8 (Kg DQO/m<sup>3</sup>·día) durante toda la investigación; teniendo un valor promedio en la etapa de arranque de 0.43 Kg DQO/m<sup>3</sup>·día y en la etapa de operación de 0.91 Kg DQO/m<sup>3</sup>·día. La VCO se mantuvo casi constante durante los 4 primeros meses en la etapa de arranque, con valores por debajo de 0.65Kg DQO/m<sup>3</sup>·día. Para la adecuación de las bacterias, los valores de la concentración se elevaron posteriormente.

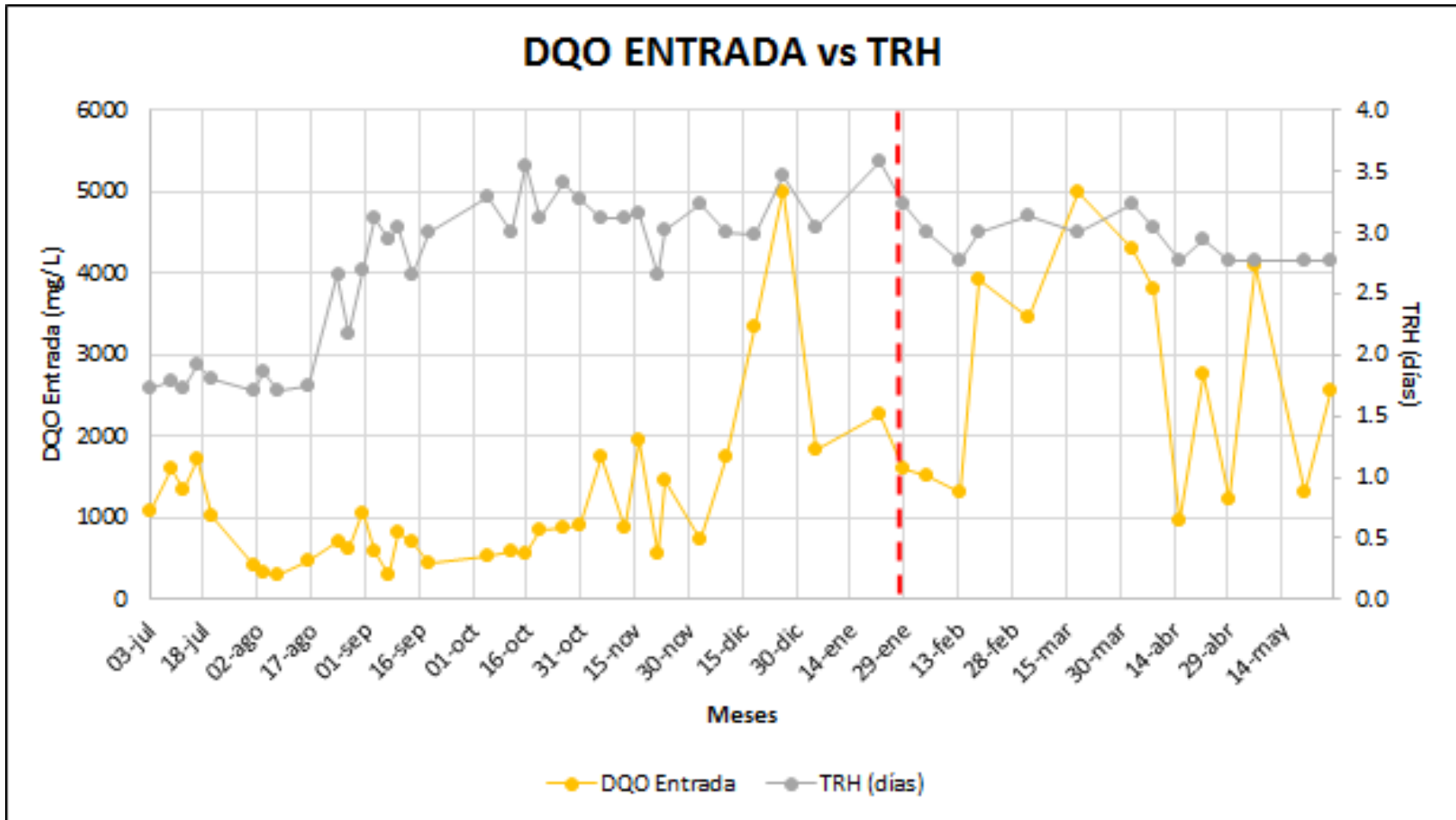
En la etapa de operación sedieron dos tomas de muestras (2 y el 8 de abril del 2013) a las cuales se agregó el bicarbonato de sodio pasado 24 horas a la carga de la muestra compuesta en el tanque ecualizador, esto influenció a la eficiencia del tratamiento. En las tomas posteriores se normalizó la colecta e inmediatamente las bacterias incrementaron la eficiencia de tratamiento manteniéndose también en esta etapa de operación por encima del 70% (Ver Figura 13).

Se presume que esta disminución del pH propició la generación de ácido láctico y por consiguiente la presencia de ácido propiónico y butírico, este comportamiento se explica en el acápite 3.3.1, b. ACIDOGÉNICA O FERMENTATIVA. Estos ácidos grasos se pueden presentar tanto en su forma ionizada, como en la no-ionizada, siendo las formas no ionizadas del acetato, propionato y butirato las más tóxicas para las arqueas metanógenicas (Van Lier et al, 1993; citado por Almeida, 2013). La acumulación de ácidos grasos volátiles (AGV)

conlleva a la disminución del pH en el sistema, dicha caída de pH afecta la metanogénesis. (Almeida, 2011).

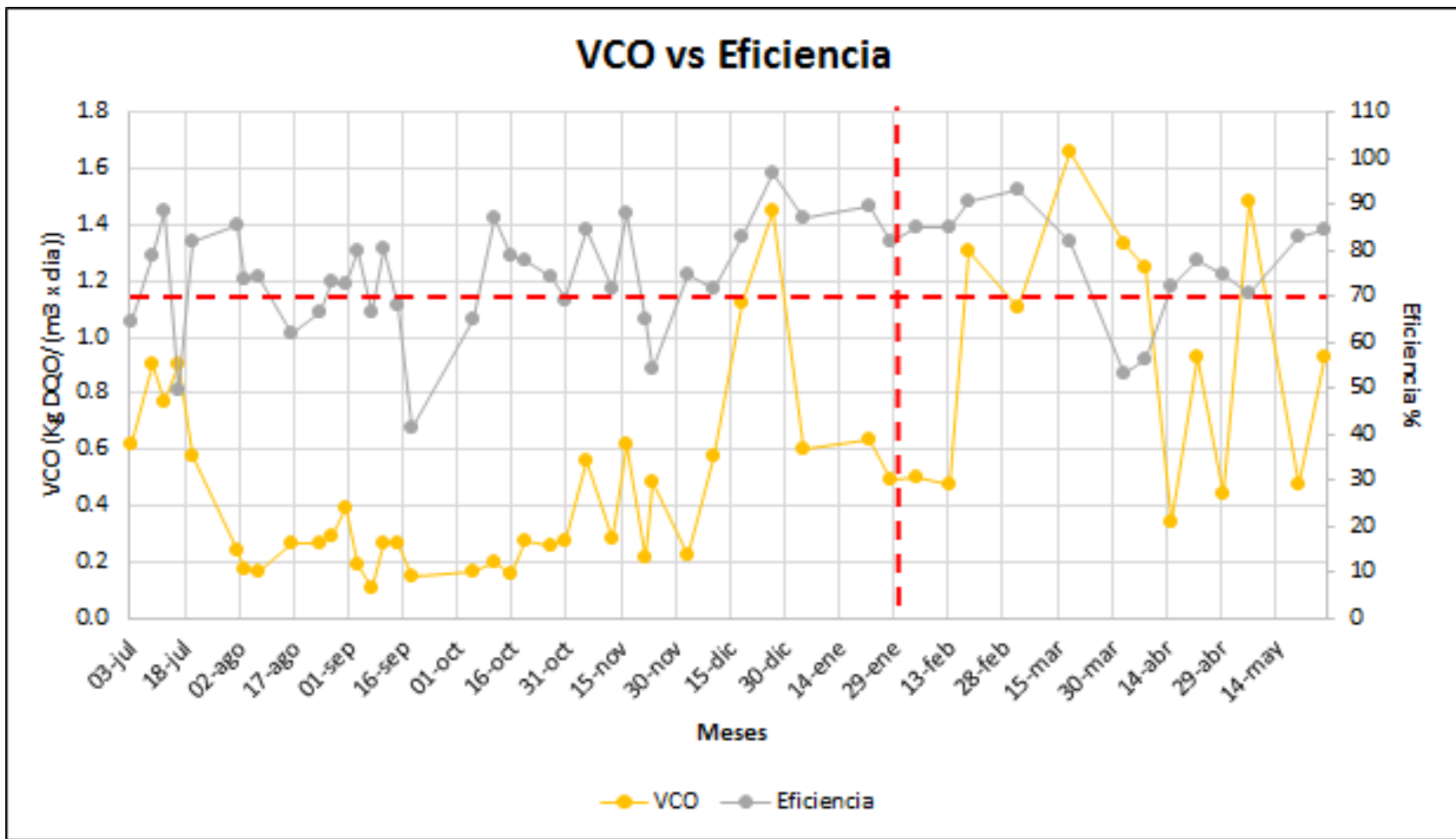
Los efluentes lácteos tienen un pH generalmente neutros o ligeramente alcalinas, pero tienen tendencia a volverse ácidas muy rápidamente a causa de la fermentación del azúcar de la leche produciendo ácido láctico, sobre todo en ausencia de oxígeno y la formación simultánea de ácido butírico, descendiendo el pH entre 4,5 - 5,0. (Parra & Campos, 2013).

La variabilidad del comportamiento de los datos obtenidos del VCO en la etapa de operación fue porque el valor de la DQO no se pudo controlar por obtenerse a partir de una muestra compuesta colectada cada hora, estas tomas pudieron coincidir o no con el vertimiento del efluente de la planta de leche (no tenían un horario fijo) producto de las actividades productivas para la elaboración de productos lácteos.



**Figura12: Comportamiento de la DQO de Entrada vs THR**

Fuente: Elaboración Propia



**Figura13: Comportamiento de la VCO de Entrada vs Eficiencia**

Fuente: Elaboración Propia

El Cuadro 19 compara los resultados de experiencias obtenidas por otros autores con las de esta investigación.

**Cuadro 19: Otras Experiencias vs Esta Investigación**

<b>Investigación</b>	<b>DQO (mg/l)</b>	<b>VCO (Kg DQO/m<sup>3</sup>·día)</b>	<b>TRH (Días)</b>	<b>Eficiencia (%)</b>
Tawfika	3383 ± 1345	4.4	1	69 a 79
González	500 a 2200	0.42 a 2.10	5	93.4 a 96.9
Hamerski	1078 a 2482	12.58 a 29.2	0.75	60.0 a 64.9
Este Estudio	284 a 4988	0.11 a 1.74	2.7	41 a 96.9

Fuente: Elaboración Propia

Tawfika realizó un trabajo de investigación donde se evaluó la viabilidad de tratamiento de un efluente de una fábrica láctea mezclada con aguas residuales domésticas, usando una UASB como sistema de tratamiento; trabajó con TRH de 24 h y las tasas de carga orgánica van desde 1.9 hasta 4.4 Kg DQO/m<sup>3</sup>·día. El promedio de la DQO y la DBO<sub>5</sub> de las concentraciones del efluente en el reactor UASB eran de 1385 y 576 mg/l, correspondiente al porcentaje de eliminación de 69% y 79%, respectivamente (Tawfika et al, 2007).

González evaluó la aplicación de la digestión anaerobia a los residuales de industrias lácteas, donde las variaciones programadas para los valores de la DQO en la alimentación del reactor y el TRH, permitieron experimentar en un rango de carga orgánica volumétrica aplicada, que varió desde 0.42 hasta 2.10 Kg DQO/m<sup>3</sup>·día. En los resultados obtenidos, la eficiencia resultó alta de 93.4 a 96.9%, además de su alta estabilidad lo que indica que se depura eficientemente este tipo de efluente residual (González J. et al, 1994).

Hamerski evaluó el tratamiento de efluente industrial de leche en Brasil, cuyos resultados se resumen en el Cuadro 19. Se aprecia que trabaja con mayores VCO, esto fue posible ya que el inóculo que utilizó tuvo una actividad de 0.225 Kg DQO/(Kg SV·día).

Como se puede notar los valores promedio de los parámetros obtenidos en esta investigación fueron diferentes de los otros autores mencionados por otro lado se obtuvieron coincidencias en las eficiencias y VCO. El TRH no se pudo incrementar su valor de los 2.7 días promedio por ende se tuvo que trabajar a una mayor VCO, esto porque se tenía una limitación de la actividad de metanogénica del inóculo por ser muy baja, como consecuencia la biomasa no toleró cargas másicas (CM) elevadas.

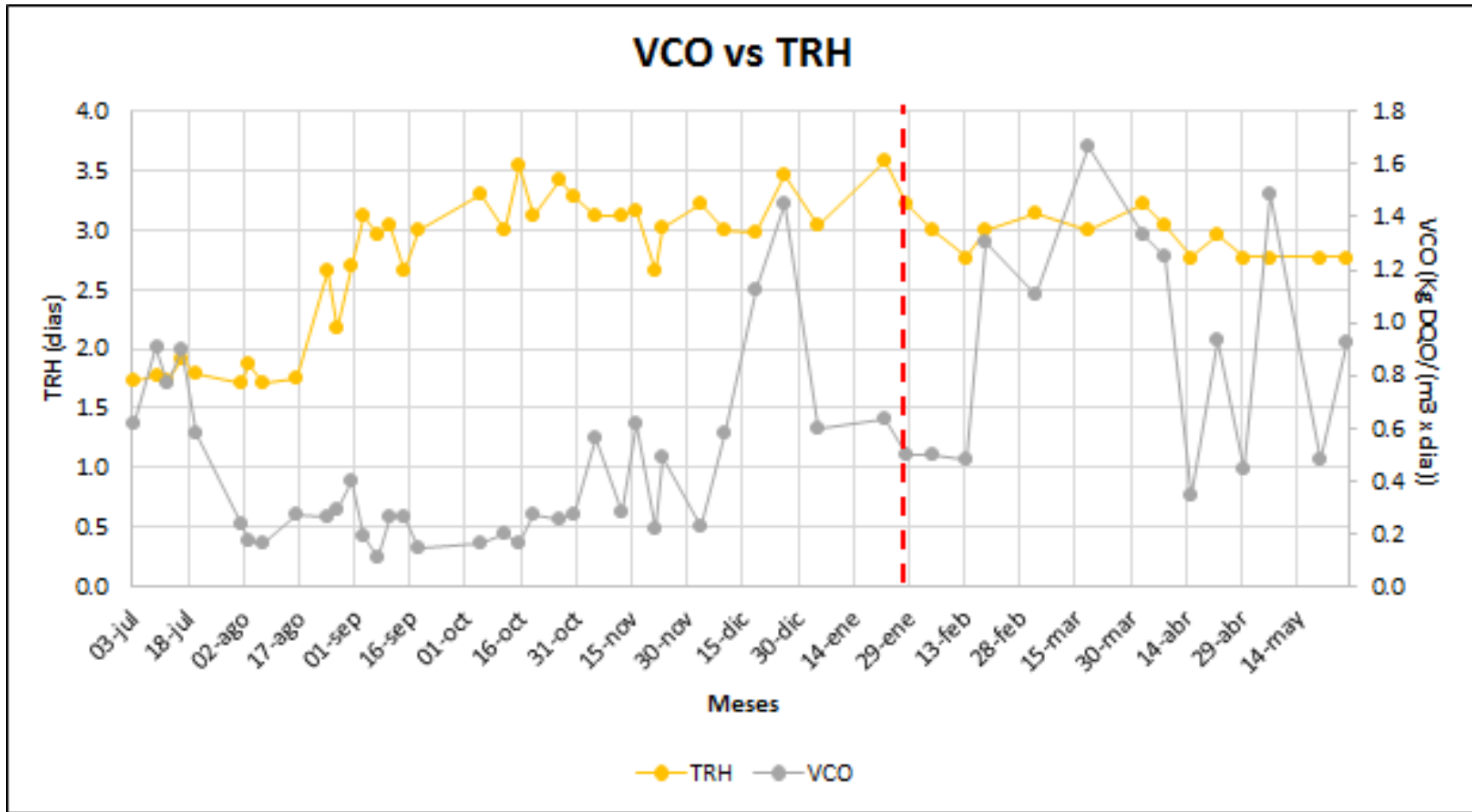
En la Figura 14 se muestra el comportamiento de VCO en relación al TRH tanto en la etapa de arranque como en la operación.

En la Figura 15, la VCO tiene el mismo comportamiento de la DQO de entrada, esto se debió a la relación directamente proporcional entre la VCO y la concentración de la DQO de entrada ( $VCO = DQO \cdot Caudal / Vol. Reactor$ ).

Como se muestra en la Figura 16, en la etapa de arranque se obtuvieron 10 datos por debajo del 70% de eficiencia de los 34 que se generaron y en la etapa de operación se obtuvieron 2 datos por debajo del 70% de eficiencia de los 14 que se generaron; esto se debió principalmente a las variaciones de los procesos productivos (producción irregular) y por averías en los equipos de la Planta.

Referente a la concentración de DQO de entrada se puede apreciar que durante los 4 primeros meses se mantuvo en forma constante, a diferencia de los 2 meses posteriores donde se aprecia una elevación de la concentración. En la etapa de operación los datos colectados de la concentración de DQO de entrada al reactor fueron irregulares, pero fueron representativos dado que se colectó en forma de muestra compuesta durante una jornada de trabajo. Pese a esta irregularidad de la concentración de DQO a la entrada del reactor, tanto en la etapa de arranque como en la de operación, se pudieron obtener en promedio eficiencias en un 75.4%.

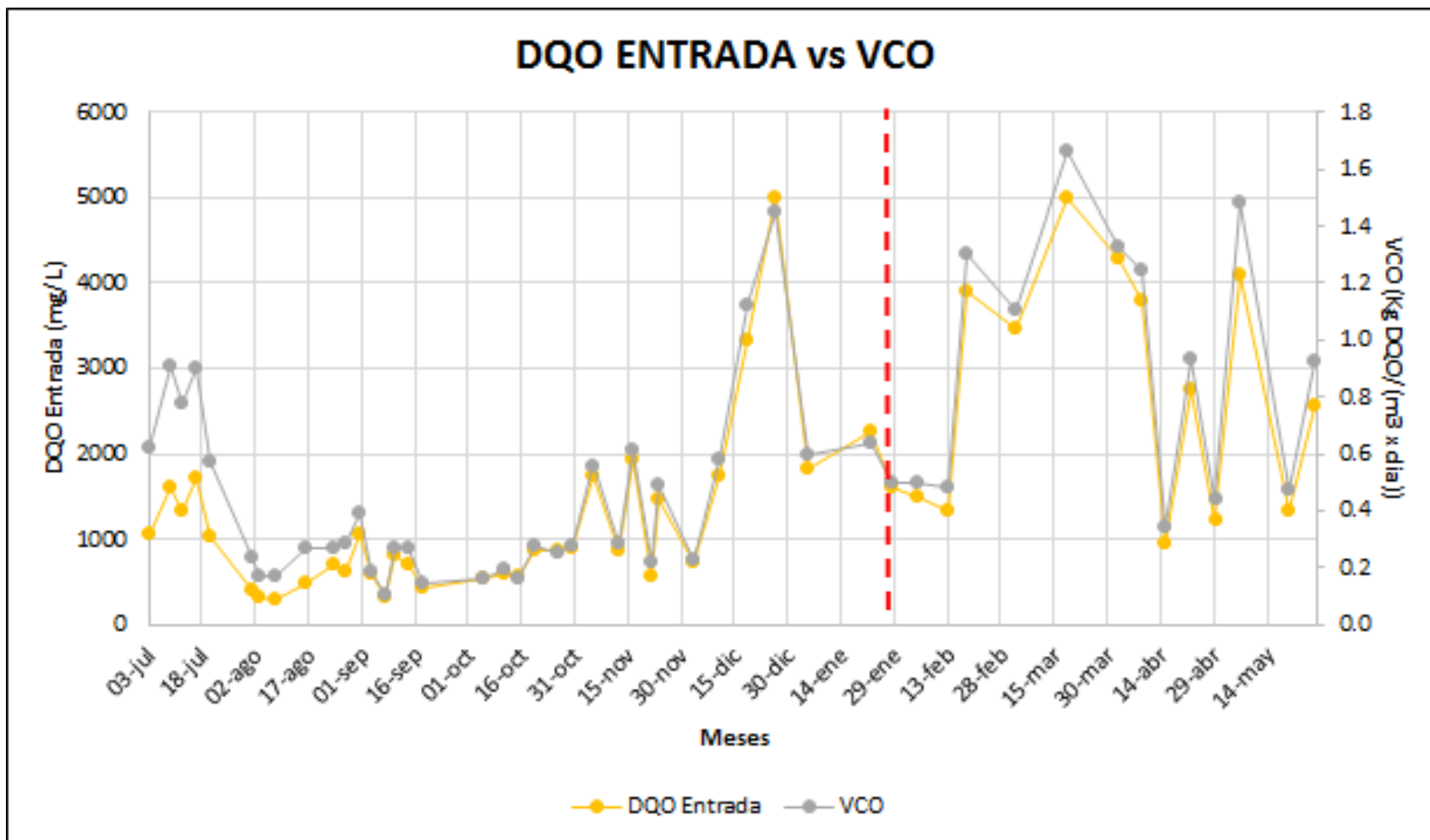
Las eficiencias alcanzadas en ambas etapas fueron constantes, teniendo así promedio de 74.3% de eficiencia de tratamiento en el arranque y un 77.9% de eficiencia de tratamiento en la operación.



**Figura 14: Comportamiento de la VCO de entrada vs THR**

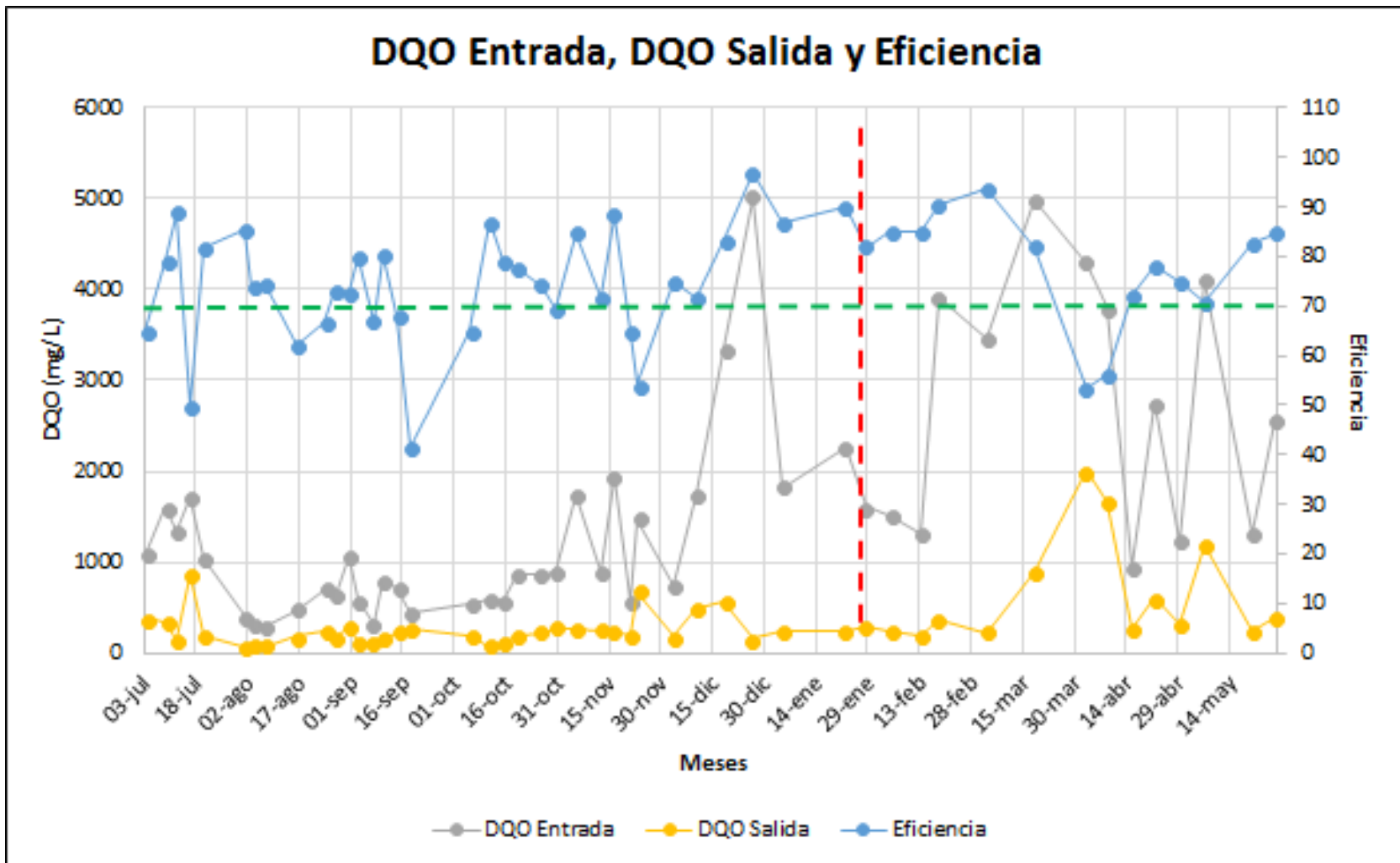
Fuente: Elaboración Propia





**Figura 15: Comportamiento de la DQO de Entrada vs VCO**

Fuente: Elaboración Propia



**Figura 16: Comportamiento de la DQO entrada, DQO salida y la eficiencia**

Fuente: Elaboración Propia

#### 5.4 COMPOSICION DEL BIOGAS

En esta investigación se monitoreó en dos fechas la calidad del biogás que se produjo en el reactor, obteniéndose valores de metano superiores al 60%, estos resultados se muestran en el Cuadro 20.

**Cuadro 20: Composición de biogás**

<b>Parámetro</b>	<b>15/02/2013</b>	<b>22/02/2013</b>
Metano	61.1 %	61.5 %
Dióxido de carbono	19.2 %	23.2 %
Oxígeno	0.0 %	0.0 %
Bal (conjunto otros gases)	20.7 %	15.3 %

Fuente: Elaboración Propia

#### 5.5 TEMPERATURA DE AFLUENTE Y EFLUENTE DEL REACTOR

Los datos de temperatura del efluente y afluente del reactor no se consideraron en este investigación ya que se detectó fallas de funcionamiento del equipo de monitoreo.

## VI. CONCLUSIONES

Según los resultados obtenidos se puede concluir que es viable la tratabilidad del efluente generado por la Planta Piloto de Leche de la UNALM, haciendo uso de un Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (UASB) principalmente por alcanzar eficiencias de tratamiento con valores promedio superiores al 70% en términos de DQO, con un 95% de confianza, por contener materia orgánica biodegradable disponible para el consumo de las bacterias y por generar tolerancia a la presencia de los químicos presentes en el efluente de la planta, tanto en la etapa de arranque como en la operación.

La caracterización del efluente de la Planta Piloto de Leche de la UNALM permitió verificar el cumplimiento de los requisitos mínimos para ser tratado anaerobiamente, uno de los más importantes fue la relación DQO/N/P (100/7/1), la cual se encuentra por encima de la concentración mínima que se necesitaba cumplir.

Se construyó un reactor UASB el cual cumplió con las características hidráulicas de diseño, teniendo un caudal promedio de alimentación de 75.3 l/día, con un tiempo de retención hidráulico promedio de 2.8 días y una velocidad ascensional promedio de 0.191m/h.

La baja actividad del inóculo fue la principal limitante para el tratamiento del efluente de la planta de leche, evitando trabajar con mayores valores de velocidad de carga orgánica y menor tiempo de retención hidráulico.

El inóculo se aclimató al efluente de la planta de leche porque mantuvo eficiencias de tratamiento superiores al 70%, esta eficiencia se mantuvo aun cuando la concentración de DQO de entrada fue elevada.

Los valores de los sólidos volátiles del inóculo fueron aumentando en el tratamiento, por ende el reactor pudo tolerar mayores cargas másicas producto del incrementode la concentración de la DQO de entrada.

La DQO es el parámetro que permitió calcular la eficiencia del tratamiento la cual consistió en monitorear el valor de la concentración del afluente y efluente del reactor durante el tratamiento.

Los valores promedio de DQO de salida del reactor obtenidos se encuentran por debajo del valor máximo admisible (1000 mg/l) determinada por la ley de vertimientos a alcantarillado DS N° 021-2009 – Vivienda.

El pH fue un parámetro delicado, su valor debió ser estrictamente controlado en el tanque equalizador para mantenerlo alrededor de 7 y así evitar la presencia de Ácido Láctico responsable de la generación de acidez y promover la presencia de Ac. Butírico y Propiónico (Ácidos Grasos Volátiles) en el efluente a tratar.

No se evaluó la cinética de la concentración de la DQO, por tener una variabilidad e irregularidad del comportamiento que describió este parámetro.

## VII. RECOMENDACIONES

Se recomienda trabajar con TRH elevados, mayores a los utilizados en este estudio, para una rápida aclimatación de los microorganismos; ya que al no poder controlar estrictamente la concentración de materia orgánica que ingresa al reactor, se debe extender la etapa de arranque para lograr una estabilidad en el sistema.

En futuras investigaciones, la aplicación del bicarbonato de sodio en el tanque equalizador, se debe realizar al finalizar la carga y no dejando un tiempo prolongado para neutralizar el pH, esto para evitar tener problemas con la generación de Ácidos Grasos Volátiles.

Para la mejor aclimatación de las bacterias en la etapa de arranque, se debe coleccionar la muestra en el equalizador, al inicio del vertido del efluente del suero de queso de la planta de leche, esto para que no se vean afectadas de manera significativa por los químicos que pueden estar presentes en el vertimiento y tengan mayor disponibilidad de materia orgánica.

Cuando se detecte que el vertimiento del efluente de la planta sea irregular (de forma visual, olor, pH por debajo de 4 o superiores a 9), posiblemente ocasionada por alguna falla de algún equipo o cambio en sus procesos habituales, se recomienda no realizar la carga al tanque equalizador para que las bacterias no se vean afectadas.

Si la irregularidad de la concentración del afluente del reactor se pudiera controlar, para futuras investigaciones se recomendaría describir el comportamiento de la cinética de los parámetros.

## VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- APHA (1998) Standard methods for the examination of water and wastewater. American PublicHealthAssociation. 19th ed. Washington, DC, EEUU.
- Almeida A., Nafarrate-Rivera E., AlvaradoA., Cervantes-OvalleA., LuevanosM.P.E., OropezaR., BalagurusamyN., (2011) Expresión Genética En La Digestión Anaerobia. Universidad Autónoma de Coahuila (UNAM), Cuernavaca, Morelos, México.
- Biomasa Digestores anaerobios, IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía), BESEL, S.A. (Departamento de Energía), ISBN-13: 978-84-96680-21-0, 2007-Madrid-España.
- Chamorro J.; López E.; Astaiza J.; Benavides C.; Hidalgo A. 2010. Determinación de la calidad composicional y de residuos antibióticos betalactámicos en leche cruda expendida en el sector urbano del municipio de Ipiales.Colombia. Revista Científica: ISSN 0124-7107, Disponible en:  
[http://www.agrobit.com/Info\\_tecnica/Ganaderia/prod\\_lechera/GA000002pr.htm](http://www.agrobit.com/Info_tecnica/Ganaderia/prod_lechera/GA000002pr.htm).
- Chen, Y.; Cheng, J. y Creamer, K. 2007. Inhibition of anaerobic digestion process: A review. Department of Biological and Agricultural Engineering, North Carolina State University, Raleigh. ISSN: 4044-4064.
- Demirel, B.; Yenigun, O. y Onay, T. 2004.Anaerobic treatment of dairy wastewaters: a review. Turquía. ISSN: 2583-2595.
- Decreto Supremo N° 021-2009 “Aprueban Valores Máximos Admisibles (VMA), de las descargas de aguas residuales no domésticas, en el sistema de alcantarillado Sanitario – Ministerio de Vivienda, Peru.
- Decreto Supremo N° 022-2009 Norma Técnica OS.090 “Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales” delReglamento Nacional de Edificaciones - Ministerio de Vivienda, Peru.
- Ergüder, T.; Tezel, U.; Güven, E. Demirer, G. 2000. Anaerobic biotransformation and methane generation potencial of cheese whey in batch and UASB reactors. Turquía. ISSN: 643-650.
- Federación Nacional de la Industria Láctea. 2008, Contaminacion de las Aguas, Sevilla-España.Disponible en:  
[http://api.eoi.es/api\\_v1\\_dev.php/fedora/asset/eoi:48159/componente48157.pdf](http://api.eoi.es/api_v1_dev.php/fedora/asset/eoi:48159/componente48157.pdf)

- Gelegenis, J.; Georgakakis, D.; Angelidaki, I. y Mavris, V. 2007. Optimization of biogas production by co-digesting whey with diluted poultry manure. Greece. ISSN: 2147-2160
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), 2007, Madrid, España. Disponible en:  
[http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos\\_10737\\_Biomasa\\_digestores\\_07\\_a996b846.pdf](http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10737_Biomasa_digestores_07_a996b846.pdf)
- Gonzáles J.; Valdés P.; Nieves G. y Gerrero B. 1994. Aplicación de la Digestión Anaerobia a los Residuales de Industrias Lácteas. Habana, Cuba.
- Gonzales Carla y Porlles Diana. EV 2012, Estimación de la huella hídrica de la Planta Piloto de Leche de la Molina. Trabajo de investigación para optar el título de Ingeniero Ambiental. Lima, Universidad Nacional Agraria La Molina. 99p.
- Groppelli, E. 2008. Tratamiento anaeróbico de efluentes ácidos agroindustriales. AIDS (Asociación Argentina de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente). ISSN 0328-2937. Disponible en: <http://www.eg-ingenieria.com.ar/pdf/revista-aidis-n-100-set-dic08-tratamiento-anerobico-de-efluentes-acidos-agroindustriales.pdf>
- Hassan A. y Nelson B. 2012. Anaerobic fermentation of dairy food wastewater. Journal of Dairy Science, Volume 95, Issue 11.
- Hamerski F. 2012. Partida de un reactor anaerobio de manto de lodos (UASB) en el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea. Universidad Federal de Santa Maria (UFMS). Brazil.
- Hernández R. 2010. Metodología de la Investigación, Quinta Edición, Editorial Mc Graw Hill / Interamericana Editores S.A.
- Jorge GONZÁLEZ, Pedro VALDÉS, Gertrudis NIEVES y Barbarita Guerrero (1994), Aplicación De La Digestión Anaerobia A Los Residuales De Industrias Lácteas, Instituto de Investigaciones para la Industria Alimenticia, Habana, Cuba.
- Kalyuzhnyi, S; Perez, E. y Rodriguez, J. (1996) Anaerobic treatment of high-strength cheese-whey wastewaters in laboratory and pilot uasb-reactors. México
- Liviac D. 2003. Aplicación del Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente en Manto de Lodos al Tratamiento del Suero de Queso a Escala de Laboratorio, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.



- Martí N. 2006. Phosphorus precipitation in Anaerobic digestion process. ISBN: 1-58112-332-9. USA, Florida. Disponible en: <http://www.bookpump.com/dps/pdf-b/1123329b.pdf>
- Mendenhall, W.; Beaver, R. y Beaver B. 2006. Introducción a la probabilidad y Estadística. Trad. Brooks/Cole. 12da Edición. México, DF. CENGAGE Learning. 776 Páginas.
- Mockaitis, G.; Ratusznei, S.; Rodrigues, J.; Zaiat, M. y Foresti, E. 2005. Anaerobic whey treatment by a stirred sequencing batch reactor (ASBR) effects of organic loading and supplemented alkalinity. Journal of environmental management. Brazil. ISSN: 198-206.
- Monsalve, J. y González, D. 2005. Elaboración de un queso tipo ricotta a partir de suero lácteo y leche fluida. Maracaibo, Venezuela. Revista científica. ISSN 0798-2259. Disponible en: <http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=95915609>
- Norma Técnica Peruana de Obras de Saneamiento S090, 2006. Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales.
- Parra Huertas R. y Campos Montiel R. (2013). Tratamiento De Lactosuero Ácido En Un Reactor UASB A Diferentes Cargas Constantes Y Puntuales. Fundación Hidalgo. México.
- Rico, J.; García, P. y Polanco, F. 1990. Anaerobic treatment of cheese-production wastewater using a UASB reactor. España. ISSN: 271-276.
- Rubio J. 2000. Estadística Aplicada, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.
- Soto, M; Méndez, R y Lema, J.(1992) Determinación de toxicidad y Biodegradabilidad anaerobia de aguas residuales. Universidad de Santiago de Compostela. España
- Sankar, Ramasamy, Gajalakshmi, Sanjeevi y Abbasi, 2006. Studies on treatment of low-strength effluents by UASB reactor and its application to dairy industry wash waters. Centre for pollution control and energy technology. India.
- Tawfika A., Sobheyb M., Badawya M. (2007) Treatment of a combined dairy and domestic wastewater in an up-flow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor followed by activated sludge (AS system). Ain Shams University, Cairo, Egypt.
- Vela R. 2001. Estudio de la precipitación de carbonato de calcio en el tratamiento anaerobio de aguas residuales. Tesis Doctoral. Valladolid. España.
- Yan, J.; Lo, K. y Liao, P. 1989. Anaerobic Digestion of cheese whey using an upflow anaerobic sludge blanket reactor. University of British Columbia, Vancouver. Canadá. ISSN: 257-271.

# ANEXOS

## Anexo 1. Resultados de caracterización J. RAMÓN (21/05/2012)

<b>INFORME DE ENSAYO N° MA12120920 CON VALOR OFICIAL</b>				
		Cod. Cliente	PPPL-001	
		Cod. Lab.	1219472	
		Tipo de Producto	Efluente industrial	
Parámetro	Unidad	L.D.	Resultado	
<b>Metasal Totalar (ICP)</b>	Aluminio	mg/L	0,009	0,347
	Antimonio	mg/L	0,01	0,02
	Arsenico	mg/L	0,005	0,009
	Bario	mg/L	0,0006	0,0523
	Berilio	mg/L	0,0002	0,0004
	Bismuto(*)	mg/L	0,002	<0,002
	Boro	mg/L	0,002	0,424
	Cadmio	mg/L	0,0007	0,0025
	Calcio	mg/L	0,01	226,6
	Cerio	mg/L	0,004	<0,004
	Cobalto	mg/L	0,002	<0,002
	Cobre	mg/L	0,001	0,030
	Cromo	mg/L	0,001	0,007
	Ertano	mg/L	0,002	<0,002
	Ertrancia	mg/L	0,001	3,264
	Fórfaro	mg/L	0,007	12,32
	Hierro	mg/L	0,002	0,600
	Litio	mg/L	0,007	0,022
	Magnorio	mg/L	0,002	50,21
	Mangano	mg/L	0,001	0,025
	Molibdeno	mg/L	0,002	0,002
	Niquel	mg/L	0,002	<0,002
	Plata	mg/L	0,0002	0,0012
	Plomo	mg/L	0,005	0,021
	Plutonio	mg/L	0,02	56,20
	Selenio	mg/L	0,006	0,017
	Silicio	mg/L	0,01	1,95
	Sodio	mg/L	0,01	451,7
	Talio	mg/L	0,002	<0,002
	Titanio	mg/L	0,002	0,004
	Vanadio	mg/L	0,001	0,006
	Zinc	mg/L	0,001	0,203
	Aceites y grasas	mg/L	1	<1
Demanda bioquímica de oxígeno	mg/L	2	300	

**Legenda:** L.D = Límite de detección      ... = No analizado

<b>INFORME DE ENSAYO N° MA12050447</b>			
		Cod. Cliente	PO2-1
		Cod. Lab.	1206474
		Tipo de Producto	Efluente industrial
Parámetros	Unidad	L.D.	Resultados
Alcalinidad total	mg/L CaCO <sub>3</sub>	1	196
Demanda química de oxígeno	mg/L	5	547
Sulfatos	mg/L	0.156	488,4

**Legenda:** L.D = Límite de detección      ... = No analizado

Anexo 2. Resultados de caracterización J. RAMÓN (27/11/2012)

<b>INFORME DE ENSAYO N° MA12120920 CON VALOR OFICIAL</b>				
		<b>Cad. Cliente</b>	<b>PPPL-001</b>	
		<b>Cad. Lab.</b>	<b>1219472</b>	
		<b>Tipo de Producto</b>	<b>Efluente industrial</b>	
<b>Parámetros</b>		<b>Unidad</b>	<b>L.D.</b>	<b>Resultado</b>
<b>Metales Totales (ICP)</b>	Aluminio	mg/L	0.009	0,347
	Antimonio	mg/L	0.01	0,02
	Arsenico	mg/L	0.005	0,009
	Bario	mg/L	0.0006	0,0523
	Berilio	mg/L	0.0002	0,0004
	Bismuto(*)	mg/L	0.008	<0,008
	Boro	mg/L	0.002	0,434
	Cadmio	mg/L	0.0007	0,0025
	Calcio	mg/L	0.01	286,6
	Cerio	mg/L	0.004	<0,004
	Cobalto	mg/L	0.002	<0,002
	Cobre	mg/L	0.001	0,030
	Cromo	mg/L	0.001	0,007
	Estaño	mg/L	0.003	<0,003
	Extracción	mg/L	0.001	1,364
	Fósforo	mg/L	0.007	12,88
	Hierro	mg/L	0.002	0,600
	Litio	mg/L	0.007	0,032
	Magnesio	mg/L	0.002	50,21
	Manganeso	mg/L	0.001	0,025
	Moibdeno	mg/L	0.002	0,008
	Niquel	mg/L	0.002	<0,002
	Plata	mg/L	0.0008	0,0012
	Plomo	mg/L	0.005	0,021
	Potasio	mg/L	0.02	56,20
	Selenio	mg/L	0.006	0,017
	Silicio	mg/L	0.01	1,95
	Sodio	mg/L	0.01	451,7
	Talio	mg/L	0.008	<0,008
	Titanio	mg/L	0.002	0,004
Vanadio	mg/L	0.001	0,006	
Zinc	mg/L	0.001	0,203	

### Anexo 3. Validación estadística de los resultados

Para la determinación de la normalidad se evaluó los valores de los resultados obtenidos de la DQO de Entrada, DQO de Salida y Eficiencia de Tratamiento, tanto en la etapa de arranque y operación por separado. Para este análisis se utilizó un programa SPSS (Ver Cuadro 21).

**Cuadro21: Shapiro-Wilk W test for normal data**

Variable	Obs	W	V	z	Prob>z
<b>DQO_Ent_A</b>	34	0.74951	8.747	4.519	0.00001
<b>DQO_Sal_A</b>	34	0.78584	7.478	4.192	0.00001
<b>DQO_Ent_O</b>	14	0.89998	1.851	1.212	0.11272
<b>DQO_Sal_O</b>	14	0.75033	4.621	3.013	0.00129
<b>Ef_Arranque</b>	34	0.96672	1.162	0.313	0.37714
<b>Ef_Operación</b>	14	0.89500	1.943	1.308	0.09545

Fuente: Propia, SPSS

Se identificó que los resultados de la eficiencia de arranque y operación tienen una baja probabilidad (0.3 y 0.09 respectivamente), además tienen datos dispersos por ello se puede definir que posee una mínima dispersión normal o una casi distribución normal. Por todo ello se puede mencionar que los resultados de eficiencias pertenecen al grupo de las pruebas no paramétricas.

Los resultados fueron evaluados por Inferencias Estadísticas vía el método de Intervalos de Confianza con variancia conocida para datos con un comportamiento casi normal. La elección permitió evaluar los valores obtenidos en la eficiencia de tratamiento tanto en la etapa de Arranque como en la de Operación, con un nivel de confianza de 95%.

Las hipótesis estadísticas que se plantearon fueron las siguientes:

Ho: La eficiencia del tratamiento es menor igual al 70%.

H1: La eficiencia del tratamiento es mayor al 70%.

$$LIC(\mu) = \bar{x} - Z_{tab}\sigma_{\bar{x}}$$

$$LSC(\mu) = \bar{x} + Z_{tab}\sigma_{\bar{x}}$$

Dónde:

LIC ( $\mu$ ): Límite Inferior de Confianza

LSC ( $\mu$ ): Límite Superior de Confianza

$$Z_{tab} = Z \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right)$$

$$\alpha=0.05 \text{ y } \sigma_{\bar{x}n} = \sqrt{\frac{\sigma_A^2}{n_B}}$$

**Cuadro 22: Intervalos de confianza de la eficiencia**

<b>Etapa</b>	<b>n</b>	<b>Ef. Prom</b>	<b>Variancia</b>	<b>N° de Ef. mayor 70 %</b>	<b>Desv</b>
<b>Arranque</b>	34	74.3	141.490093	23	2.039968949
<b>Operación</b>	14	77.9	136.136647	12	3.118340299

Fuente: Elaboración Propia

Con  $\alpha=0.05$ , n arranque = 34,  $Z_{tab} = Z(1-0.05/2) = 1.96$  (dato obtenido de tabla de función de distribución normal estándar).

Arranque:

$$LIC(\mu_A) = 70.346802 \text{ y } LSC(\mu_A) = 78.343481$$

$$\text{Conf} [70.346802 \leq \mu_A \leq 78.343481]$$

Interpretación: Existe suficiente evidencia para rechazar la hipótesis  $H_0$ , porque el valor de la eficiencia media del tratamiento menor igual a 70%, no se encuentra dentro del 95% de confianza (Conf), por el contrario se acepta la hipótesis  $H_1$ , porque el valor de la eficiencia media del tratamiento mayor a 70%, se encuentra dentro del 95% de confianza (Conf) en la etapa de arranque.

Operación:

$$\text{LIC } (\mu\text{O}) = 70.346802 \text{ y } \text{LSC } (\mu\text{O}) = 78.343481$$

$$\text{Conf } [71.765766 \leq \mu\text{O} \leq 83.989660]$$

Interpretación: Existe suficiente evidencia para rechazar la hipótesis  $H_0$ , porque el valor de la eficiencia media del tratamiento menor igual a 70%, no se encuentra dentro del 95% de confianza (Conf), por el contrario se acepta la hipótesis  $H_1$ , porque el valor de la eficiencia media del tratamiento mayor a 70%, se encuentra dentro del 95% de confianza (Conf) en la etapa de operación.

#### Anexo 4. Condición del inóculo durante la investigación

PARÁMETRO	VALOR
Vol. Reactor (l)	199.32
Vol. Lodo (l)	77.65
Vol. Lodo (l) 19/10/12	97.65
Vol. Lodo (l) 18/03/13	123.73
SV (gr/l) o (Kg/m <sup>3</sup> )	4.51
SV (gr/l) o (Kg/m <sup>3</sup> ) 19/10/12	13.04
SV (gr/l) o (Kg/m <sup>3</sup> ) 18/03/13	18.63
LR (Kg SV/m <sup>3</sup> )	1.76
LR (Kg SV/m <sup>3</sup> ) 19/10/12	6.39
LR (Kg SV/m <sup>3</sup> ) 18/03/13	11.56

Fuente: Elaboración Propia

#### Anexo 4. Condición del efluente durante la investigación

Fecha	Caudal (L/día)	Caudal (m <sup>3</sup> /h)	VCO Kg DQO/(m <sup>3</sup> x día) Efluente del Reactor	VCO Kg DQO/(m <sup>3</sup> x día) Afluente del Reactor	TRH (días)
03-jul	115.20	0.00480	0.62	0.40	1.7
09-jul	112.21	0.00468	0.91	0.72	1.8
12-jul	115.20	0.00480	0.77	0.69	1.7
16-jul	104.10	0.00434	0.90	0.45	1.9
20-jul	110.77	0.00462	0.58	0.47	1.8
01-ago	116.76	0.00486	0.24	0.20	1.7
03-ago	106.67	0.00444	0.17	0.13	1.9
07-ago	116.76	0.00486	0.17	0.12	1.7
16-ago	113.68	0.00474	0.27	0.17	1.8
24-ago	75.13	0.00313	0.26	0.18	2.7
27-ago	91.91	0.00383	0.29	0.21	2.2
31-ago	73.85	0.00308	0.39	0.29	2.7
03-sep	64.00	0.00267	0.19	0.15	3.1
07-sep	67.50	0.00281	0.10	0.07	3.0
10-sep	65.45	0.00273	0.27	0.21	3.0
14-sep	75.13	0.00313	0.27	0.18	2.7
18-sep	66.46	0.00277	0.15	0.06	3.0
05-oct	60.42	0.00252	0.16	0.11	3.3
11-oct	66.46	0.00277	0.20	0.17	3.0
15-oct	56.10	0.00234	0.16	0.13	3.6
19-oct	64.00	0.00267	0.27	0.21	3.1
26-oct	58.38	0.00243	0.25	0.19	3.4
30-oct	60.85	0.00254	0.27	0.19	3.3
05-nov	64.00	0.00267	0.56	0.47	3.1
12-nov	64.00	0.00267	0.28	0.20	3.1
16-nov	63.07	0.00263	0.62	0.54	3.2
21-nov	75.13	0.00313	0.21	0.14	2.7
23-nov	65.95	0.00275	0.49	0.26	3.0
03-dic	61.71	0.00257	0.23	0.17	3.2
10-dic	66.46	0.00277	0.58	0.41	3.0
18-dic	66.98	0.00279	1.12	0.93	3.0
26-dic	57.60	0.00240	1.45	1.40	3.5
04-ene	65.45	0.00273	0.60	0.52	3.0
22-ene	55.74	0.00232	0.63	0.57	3.6
28-ene	61.71	0.00257	0.50	0.41	3.2

Continuación					
04-feb	66.46	0.00277	0.50	0.43	3.0
13-feb	72.00	0.00300	0.48	0.41	2.8
18-feb	66.46	0.00277	1.30	1.18	3.0
04-mar	63.53	0.00265	1.10	1.03	3.1
18-mar	66.46	0.00277	1.66	1.36	3.0
02-abr	61.71	0.00257	1.33	0.71	3.2
08-abr	65.45	0.00273	1.25	0.70	3.0
15-abr	72.00	0.00300	0.34	0.25	2.8
22-abr	67.50	0.00281	0.93	0.73	3.0
29-abr	72.00	0.00300	0.44	0.33	2.8
06-may	72.00	0.00300	1.48	1.05	2.8
20-may	72.00	0.00300	0.48	0.39	2.8
27-may	72.00	0.00300	0.93	0.78	2.8

Fuente: Elaboración Propia



**Anexo 5. Carga másica y velocidad ascensional del efluente durante la investigación**

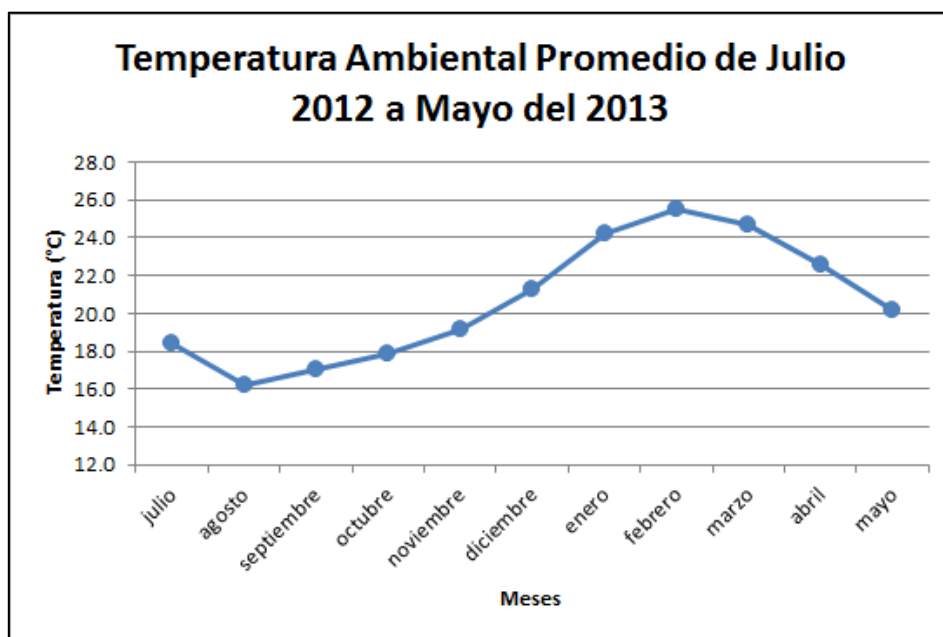
<b>Fecha</b>	<b>Carga Másica de Efluente (kgDQO/(Kg SV * dia)</b>	<b>Carga Másica de Afluente (kgDQO/(Kg SV * dia)</b>	<b>Velocidad ascensional (m/h)</b>
03-jul	0.352	0.228	0.208
09-jul	0.517	0.408	0.207
12-jul	0.440	0.391	0.208
16-jul	0.513	0.255	0.203
20-jul	0.328	0.268	0.206
01-ago	0.136	0.116	0.209
03-ago	0.097	0.072	0.204
07-ago	0.095	0.070	0.209
16-ago	0.153	0.095	0.207
24-ago	0.150	0.100	0.191
27-ago	0.163	0.120	0.198
31-ago	0.225	0.164	0.191
03-sep	0.107	0.085	0.186
07-sep	0.060	0.040	0.188
10-sep	0.151	0.122	0.187
14-sep	0.151	0.103	0.191
18-sep	0.083	0.034	0.187
05-oct	0.093	0.060	0.185
11-oct	0.112	0.097	0.187
15-oct	0.091	0.072	0.183
19-oct	0.043	0.033	0.186
26-oct	0.040	0.029	0.184
30-oct	0.043	0.030	0.185
05-nov	0.088	0.074	0.186
12-nov	0.044	0.032	0.186
16-nov	0.096	0.085	0.186
21-nov	0.034	0.022	0.191
23-nov	0.076	0.041	0.187
03-dic	0.035	0.027	0.185
10-dic	0.091	0.065	0.187
18-dic	0.176	0.146	0.188
26-dic	0.227	0.220	0.184
04-ene	0.094	0.081	0.187
22-ene	0.099	0.089	0.183
28-ene	0.078	0.064	0.185
04-feb	0.078	0.067	0.187

Continuación			
13-feb	0.075	0.064	0.190
18-feb	0.204	0.102	0.187
04-mar	0.173	0.089	0.186
18-mar	0.144	0.118	0.187
02-abr	0.115	0.061	0.185
08-abr	0.108	0.061	0.187
15-abr	0.030	0.021	0.190
22-abr	0.081	0.063	0.188
29-abr	0.038	0.029	0.190
06-may	0.128	0.091	0.190
20-may	0.041	0.034	0.190
27-may	0.080	0.068	0.190

Fuente: Elaboración Propia

### Anexo 6. Temperatura Ambiental

Se muestran los datos de temperatura ambiental promedio mensual la cual tuvo una influencia sobre la eficiencia de tratamiento del reactor UASB como se muestra en la Figura 17.



**Figura 17: Temperatura Ambiental durante la investigación**

Fuente: Elaboración Propia