

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE QUÍMICA
CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

Proyecto Final de Graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería
Ambiental

**Gestión de las aguas residuales de queseras artesanales utilizando producción más
limpia y tratamiento anaerobio con RAFA-FAFA. El caso de Santa Cruz de
Turrialba, Costa Rica**

Reychel Angélica Sánchez Martínez

Cartago, Agosto, 2015




Gestión de las aguas residuales de queseras artesanales utilizando producción más limpia y tratamiento con RAFA-FAFA. El caso de Santa Cruz de Turrialba, Costa Rica

Informe presentado a la Escuela de Química del Instituto Tecnológico de Costa Rica como requisito parcial para optar por el título de Ingeniero Ambiental con el grado de licenciatura.


Miembros del tribunal


MSc. Ing. Diana Zambrano Piamba-
Directora


MSc. Ing. Ana Lorena Arias Zúñiga
Lector 1


MSc. Ing. Andrea Pérez Vidal.
Lector 2


Dr. Ing. Luis Guillermo Romero Esquivel
Coordinador COTRAFIG


Dra. Flórida Roa Gutiérrez
Directora Escuela de Química


MSc. Ing. Ana Lorena Arias Zúñiga
Coordinadora Carrera de Ingeniería Ambiental

DEDICATORIA

Despierta, son las siete y media
y hay que empezar otra vez la tradición.

Despierta, yo también fui presa
de este mal de luchar contra el reloj.
Este milenio acaba y no es sencillo
y no lo ha sido para nadie, entérate.

Sólo despierta que yo te espero
y mamá de nuevo no dormiste.

Despierta, que no soy nada
si no estás alrededor.

Despierta, que encontré en mi almohada
para empezar de nuevo una razón.

Cuando dejo mis zapatos
pegaditos a los tuyos, no sé bien,
no entiendo bien si estoy
construyéndome un futuro
o curándote un pasado
pero sé que este cuento no acabó, no terminó.

Despierta, cortas son mis alas
pero están dispuestas al amor.

Sólo despierta, o hazme un lugarcito
para soñar y olvidemos el reloj.

Alejandro Filio

Al amor de mi vida, a quien despierto en ocasiones y me ha despertado en cada momento de mi vida, quien me motiva a seguir, gracias mami, por todo y por tanto, por creer en mí y darme el mejor el ejemplo que se puede tener, te amo. A mis sobrinas y sobrinos amados, quienes me inspiran a ser mejor persona.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por darme más de lo que necesito y ser tan buen padre.

A la profesora MSc. Ing. Diana Zambrano, por ser una guía y una luz en este camino, gracias por su interés genuino en mi aprendizaje, por su paciencia, por motivarme en todo momento y sacar lo mejor de mí.

A la profesora MSc. Ing. Ana Lorena Arias, gracias por sus consejos y ayuda incondicional, admiro su vocación por la academia; todo este proceso nació gracias a su colaboración.

Ha sido un privilegio ser instruida por dos mujeres excepcionales a quienes admiro como profesionales y como personas, gracias por enseñarme más que lo académico, por la fe, confianza y amistad que me han brindado, me siento en deuda por todo lo aprendido.

A Marco Méndez y Alejandro Córdoba y al profesor MSc. Ing. Andrés Araya y al Centro Nacional de Alta Tecnología, muchas gracias por el apoyo que me brindaron para que este proyecto fuera una realidad.

A mi familia por su amor y apoyo incondicional durante toda mi vida, en especial en los momentos difíciles, especialmente a mis sobrinos por su admiración y amor, a hermano David, por ser mi héroe y mi mamá que es mi motor, soy muy afortunada de tenerte como madre. A David Vargas, gracias por ayudarme de manera incondicional, por estar en los momentos más difíciles, por impulsarme siempre a ser mejor, por tantos años de ser mi hombro derecho.

Y a mis amigos, quienes sin duda, son el tesoro más grande que me dejó este camino

RESUMEN	9
ABSTRACT	10
1 INTRODUCCIÓN	11
1.1 OBJETIVOS	12
1.1.1 <i>Objetivo general</i>	12
1.1.2 <i>Objetivos específicos</i>	12
2 MARCO DE REFERENCIA	13
2.1 LA ACTIVIDAD QUESERA EN COSTA RICA.	13
2.1.1 <i>Fabricación artesanal de quesos.</i>	13
2.1.2 <i>Problemática ambiental asociada a la fabricación de quesos.</i>	14
2.2 PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA EN LA FABRICACIÓN ARTESANAL DE QUESOS.	16
2.3 TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES.	20
2.3.1 <i>Tratamiento Aerobio.</i>	20
2.4 TRATAMIENTO ANAEROBIO.	21
2.4.1 <i>Aspectos Generales.</i>	21
2.4.2 <i>Inóculo.</i>	22
2.4.3 <i>Parámetros de control del proceso.</i>	23
2.4.4 <i>Descomposición del efluente.</i>	25
2.4.5 <i>Reactores Anaerobios de Flujo Ascendente.</i>	28
2.4.6 <i>Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente.</i>	29
2.4.7 <i>Reactores Híbridos.</i>	31
3 METODOLOGÍA	33
3.1 ANÁLISIS DE LA GESTIÓN DEL AGUA DE LAS CINCO QUESERAS ESTUDIADAS.	33
3.1.1 <i>Visitas de inspección.</i>	33
3.1.2 <i>Análisis de la calidad del agua.</i>	34
3.2 DEFINICIÓN DE LAS ESTRATEGIAS DE PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA PARA LA MEJORA DEL PROCESO PRODUCTIVO DE LAS QUESERAS ARTESANALES DE SANTA CRUZ DE TURRIALBA.	34
3.2.1 <i>Diagnóstico de la situación ambiental y productiva.</i>	34
3.2.2 <i>Selección de una quesera para la evaluación de las oportunidades de mejora y la evaluación del agua residual generada por los reactores híbridos.</i>	35
3.3 EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DEL TRATAMIENTO RAFA-FAFA PARA LAS AGUAS RESIDUALES DE UNA QUESERA ARTESANAL DE SANTA CRUZ DE TURRIALBA.	36
3.3.1 <i>Construcción del reactor.</i>	36

3.3.2	<i>Alimentación é inóculo del reactor.</i>	39
3.3.3	<i>Arranque de reactores sin acondicionamiento del agua residual.</i>	40
3.3.4	<i>Arranque de reactores acondicionando el agua residual.</i>	41
3.3.5	<i>Pruebas de AME con adición de alcalinizante y nutrientes.</i>	42
3.3.6	<i>Estabilización del reactor con alcalinidad y nutrientes.</i>	43
4	RESULTADOS Y DISCUSION	45
4.1	ANÁLISIS DE LA GESTIÓN DEL AGUA DE LAS CINCO QUESERAS ARTESANALES DE SANTA CRUZ DE TURRIALBA.	45
4.1.1	<i>Visitas de inspección.</i>	45
4.1.2	<i>Análisis de la calidad del agua</i>	49
4.2	IDENTIFICACIÓN DE LAS OPORTUNIDADES DE MEJORA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA.	51
4.2.1	<i>Diagnóstico de la situación ambiental y productiva</i>	51
4.2.2	<i>Aplicación de las herramientas de PML en las industrias queseras artesanales de Santa Cruz de Turrialba.</i>	54
4.2.3	<i>Selección de una quesera para la evaluación de las oportunidades de mejora y la evaluación de los reactores híbridos.</i>	59
4.3	EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DEL TRATAMIENTO HÍBRIDO RAFA-FAFA DE LAS AGUAS RESIDUALES DE UNA QUESERA ARTESANAL EN SANTA CRUZ DE TURRIALBA.	62
4.3.1	<i>Estabilización del reactor sin adición de alcalinizante.</i>	62
4.3.2	<i>Dosis de alcalinizante para el almacenamiento del agua.</i>	64
4.3.3	<i>Actividad metanogénica (AME) con adición de alcalinizante.</i>	66
4.3.4	<i>Estabilización del reactor con adición de alcalinidad y nutrientes</i>	69
5	CONCLUSIONES.	79
6	RECOMENDACIONES	82
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84
7	APÉNDICES	91
	APÉNDICE 1: METODOLOGÍA UTILIZADA DURANTE EL PROYECTO.	92
	APÉNDICE 2: FOTOGRAFÍAS DE EQUIPO Y PROCESOS.	94
	APÉNDICE 3: RESULTADO OBTENIDOS.	95

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1. Degradación anaerobia de las proteínas de la leche.	26
Figura 3-1. Santa Cruz de Turrialba	33
Figura 3-2. Distribución del reactor híbrido.....	37
Figura 3-3. Estructura de los reactores.	38
Figura 3-4. A: Medio filtrante. B: Material de relleno.	39
Figura 4-1. Diagrama de proceso del queso fresco Turrialba de una quesera sin Pasteurización.....	47
Figura 4-2. Diagrama de proceso de queso tipo Turrialba para una quesera con pasteurización.	48
Figura 4-3. Potencial de aplicación de PML en las queseras que pasteurizan. Generado con EcoInspector 2.1	53
Figura 4-4. Potencial de aplicación de PML en las queseras que no pasteurizan. Generado con EcoInspector 2.1	53
Figura 4-5. Acumulación de la caseína en la separación de las etapas RAFA-FAFA.	64
Figura 4-6. Volumen de CH ₄ acumulado en los reactores a 21 °Cy 1360 msnm.....	68
Figura 4-7. Alcalinidad de los efluentes de R1.	70
Figura 4-8. Alcalinidad para los efluentes de R2	71
Figura 4-9. Relación Alcalinidad Bicarbonática (mg CaCO ₃ /L) vs pH para el R1 y R2. ...	72
Figura 4-10. Comportamiento del Índice Alfa en el tiempo para los efluentes R1 y R1 durante la alimentación con adición de alcalinizante.	73
Figura 4-11. Comportamiento de la DQO de los efluentes R1 y R2 con adición de alcalinidad.....	75
Figura 4-12. Comportamiento de la eficiencia de remoción y el índice buffer en el tiempo.	76
Figura 7-1. Difusor de estereofón.....	94
Figura 7-2. Difusor de PVC.....	94
Figura 7-3. Pruebas de actividad metanogénica con adición de alcalinizante y nutrientes..	94

LISTA DE CUADROS

Cuadro 2-1. Parámetros físico-químicos característicos del agua residual de una quesera. 14	14
Cuadro 2-2. Demanda biológica de oxígeno característica del suero de leche de vaca. 16	16
Cuadro 2-3. Balance de agua en la producción de queso fresco. 19	19
Cuadro 2-4. Comparación de los parámetros operacionales HRT y DQO para el tratamiento anaerobio de influentes lecheros y queseros..... 27	27
Cuadro 3-1. Distribución de visitas en las queseras artesanales 33	33
Cuadro 3-2. Pruebas físico-químicas realizadas a los influentes de agua residual de las cinco plantas queseras. 34	34
Cuadro 3-3. Pruebas físico químicas realizadas a los influentes de las queseras 35	35
Cuadro 3-4. Caracterización del estiércol de cerdo utilizado como inóculo..... 40	40
Cuadro 3-5. Diseño experimental para la prueba de alcalinidad..... 41	41
Cuadro 3-6. Diseño experimental de la prueba AME con alcalinizante y nutrientes..... 42	42
Cuadro 3-7. Nutrientes añadidos a la AME..... 42	42
Cuadro 3-8. Muestreo de parámetros de control para tercer experimento. 44	44
Cuadro 4-1. Descripción productiva y de planta de 5 queseras artesanales de la zona de Santa Cruz de Turrialba..... 46	46
Cuadro 4-2. Caracterización físico-química de 5 queseras de la zona de Santa Cruz de Turrialba. 50	50
Cuadro 4-3. Relaciones de volúmenes generados en la producción del queso para las queseras que pasteurizan y no pasteurizan. 54	54
Cuadro 4-4. Caracterización físico-química del influente de agua residual de la Finca 2. N=5 61	61
Cuadro 4-5. Índices de alcalinidad para R1 y R2 sin adición de alcalinizante..... 62	62
Cuadro 4-6. Demanda Biológica de los efluentes R1 y R2 para el tratamiento sin adición de alcalinizante..... 63	63
Cuadro 4-7. Alcalinidad por bicarbonatos y por AGV del agua cruda con diferentes de dosis de alcalinizante durante el tiempo. 65	65
Cuadro 4-9. Actividad metanogénica de agua cruda con diferentes de dosis de alcalinizante y nutrientes. N=1. 67	67
Cuadro 4-13. Composición de sólidos en los efluentes R1 y R2. 77	77

Cuadro 7-1. Guía de pre diagnóstico de las queseras	92
Cuadro 7-2. Índices de alcalinidad para los efluentes de R1 y R2.	95
Cuadro 7-3. Valores de DQO (mg/L) del influente, R1 y R2.	95

LISTA DE SIGLAS Y ACRÓNIMOS

Nombre	Sigla o acrónimo
Centro de Investigación en Vivienda y Construcción	CIVCO
Producción más limpia	P+L
Reactor anaerobio de flujo ascendente	RAFA
Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente	FAFA
Reactor Híbrido Anaerobio	RHA
Reactor 1	R1
Reactor 2	R2
Actividad Metanogénica	AME
Alcalinidad bicarbonática	AP
Alcalinidad AGV's	AI
Alcalinidad total	AT
Índice Buffer	IB
Índice Alfa	IA
Ácidos grasos volátiles	AGV's
Sólidos Totales	ST
Sólidos Suspendidos Volátiles	SSV
Sólidos Suspendidos Fijos	SSF

RESUMEN

La industria quesera en Costa Rica es una actividad en constante crecimiento, sin embargo no existen regulaciones para las actividades relacionadas, instalaciones, manejo de los residuos, gestión del agua, entre otros. La falta de implementación de herramientas de producción más limpia (P+L) y una mala gestión de los desechos líquidos, generan problemas ambientales. El suero de leche, es el principal contaminante asociado a estas aguas, generando inhibición en el tratamiento de agua residual, por altos niveles de DQO, grasas, sólidos y tendencia a la acidificación temprana. Esta investigación presenta un diagnóstico ambiental de las queseras artesanales de Santa Cruz de Turrialba, y propone la implementación de P+L en sus procesos y una valoración del potencial de tratamiento anaerobio RAFA-FAFA para el tratamiento sus aguas residuales. Se realizaron auditorías ambientales en cinco queseras de la zona, durante los meses de febrero a junio del 2014, se caracterizaron sus procesos, actividades, instalaciones, manejo de aguas residuales y análisis químico-físicos de las aguas residuales de cada quesera. Con la herramienta EcoInspector 2.1, se identificaron las áreas con mayor potencial de mejora. Se seleccionó una quesera para evaluar el agua residual generada mediante tratamiento anaerobio dos reactores pilotos híbridos anaerobios. Estos reactores se evaluaron en una fase sin adición de alcalinidad, con una DQO: 2 (g/L), TRH: 3.5 d, COV: 0.5714 (kg DQO/d*m³) y luego con una dosis de alcalinizante de 2g/L de NaHCO₃/L para el sustrato, DQO cercana a los 3 g/L, TRH: 2.3 d, COV: 1.2857 (kg DQO/d*m³). De las auditorías se encontró que en las queseras estudiadas, aunque producen el mismo tipo de queso, presentan diferencias entre ellas. Las áreas con mayores oportunidades de mejora son la estandarización de sus procesos, reutilización del agua, el tratamiento de aguas residuales, elaboración del cuajo para el queso y en la reutilización del suero de leche. Las aguas residuales generadas son difíciles de tratar y con características variables; no es posible implementar los reactores híbridos sin adición de alcalinizante, debido a la rápida acidificación; mientras que con valores entre los (3-6) DQO g/L, la adición de alcalinizante de 2 g NaHCO₃/L, es factible utilizar sistemas híbridos anaerobios, alcanzando eficiencias de remoción de DQO entre (65-90) % sin embargo se debe ampliar el estudio de este tipo de tratamiento.

Palabras claves: Producción Más Limpia, actividad quesera, suero de leche, aguas residuales, tratamiento anaerobio RAFA, FAFA.

ABSTRACT

The cheese industry in the country is an activity in constant growth, however there are no regulations for the related activities, facilities, waste management, water management, among others. The lack of implementation tools in clean production and poor liquid waste disposal, generate environmental problems. The whey is the main component of pollution associated with these waters, generating inhibition in the treatment of waste water by high levels of COD, fats, solids and early tendency to acidification. The present investigation provides a diagnostic in environmental issues to some non-industrial cheesemakers, and proposes management strategies by implementing clean production in their processes and an assessment of hybrid RAFA-FAFA anaerobic treatment for decontaminating their wastewaters. Environmental audits were conducted in five dairies in the area of Santa Cruz de Turrialba, where their processes, activities, facilities, and wastewater management were characterized as well as the conduction of physical and chemical analysis for the wastewater in each dairy. Using the tool EcoInspector 2.1, areas with potential for improvement were identified. A dairy farm was chosen for feeding two pilot hybrid anaerobic reactors. The reactors treatability were evaluated without adding alkalinity, with a COD: 2 (g / L), HTR: 3.5 d, VOC: 0.5714 (kg COD / m³ d *) and then with a dose of 2g / L NaHCO₃ / L for the substrate, approximately 3 g / L COD, HTR: 2.3 d, VOC 1.2857 (kg COD / d * m³). It was found that while the dairies produce the same type of cheese, there are differences between them and the areas where they present greater opportunities for improvement in the standardizing of their processes, water recycling, wastewater treatment management, curd production for cheese and the reuse of whey. The wastewater generated is difficult to treat and will have variable characteristics; it is not possible to implement hybrid reactors without adding alkalizing, because the rapid acidification; whereas with values between (3-6) g COD/L, the addition of 30 g NaHCO₃/L of alkalizer for the conditioning of inoculum, 2 g NaHCO₃/L and 1 mL/L of nutrient solution for the substrate, it is feasible to use hybrid anaerobic systems, reaching COD removal efficiencies between (65-90)%, but should expand the study of this type of treatment.

Keywords: cleaner production, cheese production, whey, waste water, RAFA, FAFA, anaerobic treatment.

1 INTRODUCCIÓN

La industria quesera es importante para el sector económico de Costa Rica, con un aumento del 7% anual (Oviedo, 2008); actualmente se utilizan 26 000 metros cúbicos diarios de leche en el país para la fabricación de queso, un 40% de esta leche se destina a la fabricación de queso de manera artesanal. Las queseras artesanales se caracterizan por ser pequeñas empresas con limitaciones económicas para acceder a tecnologías limpias y eficientes que garanticen la calidad e inocuidad de sus productos y el buen aprovechamiento de los recursos; dificultando el cumplimiento con la legislación en el manejo de las aguas residuales. El sector de Santa Cruz de Turrialba, es uno de los más importantes en la fabricación de queso artesanal y el 90% de sus familias, dependen de la elaboración de queso tipo Turrialba (Blanco, 2007).

Las aguas residuales que se generan durante el proceso productivo están compuestas de suero, detergentes, azúcar, sal, desinfectantes, entre otros (Zumbado, 2005; Garzón & López, 2008). El suero de leche es el principal componente de altos valores de (DQO) asociados a las queseras, contiene el 50% de las proteínas de la leche, grasa, minerales, entre otros (Gil, y otros, 2009; Calli & Ali , 2002; Morales & Gurza, 2002), repercutiendo en altos valores de DQO, sólidos disueltos, grasas y aceites (Garzón & López, 2008; Estrada, 1993) y acidificación temprana que dificultan el tratamiento biológico.

Para producir 1 kg de queso se requieren de 7 litros de leche, y se obtienen 6 litros de suero y 5 litros de agua como remanente (Blanco, 2007). Para el 2015 se ha proyectado una producción de queso artesanal de 548 millones de kg al año; generando 42 000 metros cúbicos de agua residual al día, con una DQO entre (15 000-43 500) mg DQO/L (Consejo Nacional de Producción, 2001; Prazere, Carvalho, & Rivas, 2012), si no se cuenta con una separación del suero de las aguas residuales. A pesar que existe un reglamento para el vertido y reúso de aguas residuales en el país, los propietarios de las queseras expresan que estas empresas no son fiscalizadas por entidades gubernamentales, ni reciben asesoramiento en la disposición de sus desechos, repercutiendo en la contaminación de suelos y ríos por la disposición directa de los efluentes de la producción de queso.

Los lodos activados han presentado buenos resultados para el tratamiento de estas aguas como sistema aerobio (Carvalho, Prazeres, & Rivas , 2013) no obstante, una de las limitaciones de las queseras artesanales, es que no se puede contar con los requerimientos

necesarios para la implementación de un tratamiento aerobio. El tratamiento anaerobio ha sido ampliamente utilizado para los influentes de industrias lácteas; los RAFA han sido los más utilizados, junto con los FAFA, con recirculación de influente o lodo y los reactores híbridos (RH) (Calli & Ali , 2002).

Estos últimos son la combinación de dos tratamientos anaerobios diferentes, los más utilizados son los que combinan los tratamientos RAFA-FAFA; las ventajas de esta combinación resulta en una menor área de construcción, mayores velocidades de ascensión, una mayor retención de la biomasa y disminución de purga de lodos gracias al material de soporte, crecimiento bacteriano en el lodo, material de empaque y espacios vacíos y todas las ventajas de ambas tecnologías (Pérez & Villegas, 2004).

En este trabajo se estudiaron cinco queseras artesanales de la zona de Santa cruz de Turrialba. Sus procesos productivos y planteles fueron caracterizados y comparados, con el fin de obtener medidas prácticas para la implementación de herramientas de producción más limpia en la fabricación del queso y las actividades relacionadas. Una vez caracterizadas las queseras, se seleccionó una quesera para analizar la factibilidad técnica de un sistema de tratamiento híbrido anaerobio RAFA-FAFA de las aguas residuales de la planta productiva.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo general

Identificar las opciones de mejora en la gestión ambiental de una quesera artesanal de la zona de Santa Cruz de Turrialba

1.1.2 Objetivos específicos

- Analizar la gestión del agua en cinco queseras artesanales de Santa Cruz de Turrialba.
- Definir las estrategias de producción más limpia que mejoren el proceso productivo de las queseras artesanales de Santa Cruz de Turrialba.
- Evaluar el potencial del tratamiento anaerobio con un sistema híbrido RAFA-FAFA de las aguas residuales de una quesera artesanal de Santa Cruz de Turrialba.

2 MARCO DE REFERENCIA

2.1 LA ACTIVIDAD QUESERA EN COSTA RICA.

Esta industria ha logrado tener una importancia en sector económico del país, teniendo un crecimiento del 140% durante la época de 1980 y el 2008, manteniendo un crecimiento sostenido del 7% anual. Aproximadamente el 50% de la leche producida en el país está destinada a la fabricación de quesos. (Oviedo, 2008).

La producción de quesos en el país tiene una representación formal del 60%, caracterizado por tener un abastecimiento constante al mercado nacional e internacional; el 40% restante es del sector informal, la cual es procesada de manera artesanal (Blanco, 2007).

El queso fresco es el tipo de queso que más se consume en el país, siendo de un 90% la preferencia sobre otros tipos de quesos que se producen como el palmito, seco, maduro, entre otros (Navarro, 1995).

2.1.1 Fabricación artesanal de quesos.

La fabricación artesanal de quesos se caracteriza por ser una actividad familiar, con poco acceso a la tecnología para la fabricación del queso (Oviedo, 2008). En el país el 32% de la producción de queso proviene queseras artesanales (Consejo Nacional de Producción, 2001)

En las plantas donde se producen los quesos artesanales se presentan limitaciones para cumplir con las prácticas de higiene, inocuidad y parámetros ambientales de los influentes de agua residual (Oviedo, 2008).

En el país existen 6 zonas queseras artesanales de gran importancia, las cuales son: Zarcero, San Isidro del General, Monteverde, Arenal, Bagaces y Santa Cruz de Turrialba. En el sector de Santa Cruz de Turrialba, el 90% de las familias se dedican a la producción de queso; por lo que el impacto comercial y ambiental es importante (Blanco, 2007).

El queso fresco mayormente conocido y preferido es el tipo Turrialba (Zumbado, 2005), proveniente de la zona de Santa Cruz de Turrialba en Cartago, siendo la fuente de trabajo del 90% de la población de la zona. En el 2012 se reportaron 148 pequeños y medianos empresarios afiliados a la Asociación de Productos Agropecuarios de Santa Cruz de

Turrialba (Rivera, 2012); y el 70% del queso fresco en Costa Rica proviene de este lugar (Blanco, 2008).

2.1.2 Problemática ambiental asociada a la fabricación de quesos.

La problemática de la industria quesera está asociada al uso y manejo del agua durante el ciclo productivo y el alto consumo de energía (Djekic, Miocinovic, Tomasevic, Smigic, & Tomic, 2013); además de los residuos grasos generados (Arroja, 2013)

Durante el proceso productivo del queso se generan aguas residuales que son una mezcla de aguas de proceso que incluyen suero de leche, proteína, lactosa, grasa, minerales, leche descremada, azúcares, aguas de lavado, jabones, detergentes y desinfectantes (Zumbado, 2005; Garzón & López, 2008); estas aguas presentan una alta carga orgánica y sal; estas características físico químicas la hacen altamente contaminante (Estrada, 1993) & (Garzón & López, 2008).

El Cuadro 2-1 presenta las características de indicadores de contaminación para una quesera que separa de manera total o parcial el remanente de suero del influente de agua residual.

Cuadro 2-1. Parámetros físico-químicos característicos del agua residual de una quesera.

DBO (mg/L)	Sólidos Totales (mg/L)	pH	Grasas y Aceites (mg/L)	Autor
2000	280	11		(Estrada, Gutierrez, Oliviano, & Rangel Rodríguez , 1993)
3500	-	10		(Garzón & López, 2008)
2500	-	9		(Bedoya, 2009)
14700	-	8	640	(Janczulowicz, Zielinski, & Debowski , 2008)
35000	65000	-	6000	(Carvalho, Prazeres, & Rivas, Cheese whey wastewater: Characterization and treatment, 2013)

Estas aguas tienden a acidificarse rápidamente por la fermentación de la lactosa (Malaspina & et al, 1995; Carvalho, Prazeres, & Rivas, 2013), produciendo ácido láctico en el suero de la leche; esta es una variable importante de considerar para la realización del diseño de tratamiento del agua residual (Calli & Ali , 2002).

En el cálculo de la huella de carbono de la producción de queso se han encontrado valores de (2-8) kg CO₂ por 1 kg de queso producido. Esto debido a la demanda de energía, generación de agua residual con alta carga orgánica (Djekic, Miocinovic, Tomasevic, Smigic, & Tomic, 2013; Arroja, Feijoo, González, Hospido, & Moreira, 2013).

Las características de las aguas residuales del proceso de producción de queso están determinadas por la mezcla o no del suero. El suero de leche es el componente principal que genera mayor problemática en el tratamiento de las aguas residuales (Carvalho, Prazeres, & Rivas, 2013); esto por su composición rica en lactosa, grasa, vitaminas, proteínas y minerales (Morales & Gurza, 2002).

El suero es el remanente de la separación de la caseína que es utilizada para la elaboración del queso y la leche remanente, contiene el 50 % de las proteínas totales de la leche (Gil, y otros, 2009; Calli & Ali , 2002; Morales & Gurza, 2002). Para la producción de 1 kg de queso, se necesitan 7 litros de leche entera y se obtienen 6 litros de suero de leche remanente; en 1997 se reportó una producción anual de 32 millones de kilos de queso artesanal al año y una generación de 520 metros cúbicos de suero al año (Consejo Nacional de Producción, 2001). Aproximadamente 520 metros cúbicos estaban siendo arrojados diariamente a ríos, pastos, entre otros.

Según Oviedo (2008), actualmente se proyecta una producción anual de 548 millones de kg queso artesanal al año y una gestión de aproximadamente 9 000 metros cúbicos al día de suero de leche; para un total de unos 42 000 metros cúbicos de agua residual en un día, proveniente de las queseras artesanales si no hace una adecuada separación del suero de leche. Estos valores pueden reducirse con un mayor aprovechamiento de la leche; valores teóricos reportan un consumo de 5 litros de leche para producir un kilogramo de queso (Kim , Thoma, Ulrich, Nutter, & Milani, 2014) .

La DBO de los residuos líquidos sin una separación del suero de leche es en promedio 32 833 mg/L. En el Cuadro 2-2 se enlistan valores reportados de DBO en la literatura.

Cuadro 2-2. Demanda biológica de oxígeno característica del suero de leche de vaca.

Valor de DBO (mg/L)	Autor
43 500	(Prazere, Carvalho, & Rivas, 2012)
32000	(Zumbado, 2005)
43790	(Villegas, 1995)
12040	(CNP, 2001)
45000	(Morales & Gurza, 2002)

2.2 PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA EN LA FABRICACIÓN ARTESANAL DE QUESOS.

Al contrario de las tecnologías comúnmente usadas que tratan con los desechos o las emisiones, conocidas como “tecnologías al final del tubo”, significando un gasto mayor para la empresa; la Producción Más Limpia (P+L) busca integrar la protección ambiental con el crecimiento productivo y económico (Arroja, 2013).

Estas técnicas están enfocadas en la prevención de la contaminación, uso racional del agua, la energía, la materia prima, la estandarización de procesos, brindar alternativas de tratamiento y reutilización de los subproductos generados, higiene, la documentación, revisión, autoevaluación y la búsqueda constante de la mejora continua (Garzón & López, 2008).

P+L se define como una estrategia de mejora continua en procesos y productos de una empresa, brindando beneficios a la empresa en el aumento de la eficiencia en los procesos, apertura económica, competitividad, cumplimiento de normativas, sentido de responsabilidad ambiental y disminución de los costos de tratamiento (Garzón & López, 2008; Basappaji & Nagesha, 2013).

Para la implementación de P+L en una empresa se deben seguir varias etapas, que al convertirlas en un ciclo, se obtiene una mejora continua con el tiempo. La primera etapa es la de “Planeación y organización”, en la cual se debe involucrar al personal de la gerencia de la empresa, puesto que su compromiso es vital para lograr el desarrollo de la P+L, ya

que el personal es el que dispone de los recursos necesarios para poder lograr la implementación.

Esta fase también involucra la definición de los objetivos, alcances del programa y metas proyectadas, así como los indicadores de control. Se debe elaborar un Plan de Trabajo que incluya la planificación de las actividades que se estarán realizando con su tiempo estimado y la persona encargada. Es recomendable identificar cuáles son las barreras que presenta la empresa para llegar a la PML (Centro de Eficiencia Tecnológica Perú, 2005; Rojas, 2011).

En la segunda etapa está la auditoría de la empresa y el análisis de su situación, lo que dará las bases para el desarrollo del programa. En esta etapa se debe recopilar toda la información posible de la empresa y de sus procesos productivos, lo que puede incluir pero no limitarse a información como los consumos energéticos, de agua, de materias primas, generación de residuos, de emisiones, de agua residual, información de la maquinaria utilizada, costos de materias primas e insumos, costo de tratar los residuos que se generen en los procesos productivos, entre otros (Centro de Eficiencia Tecnológica Perú, 2005). Es necesario realizar una inspección por toda la planta e identificar cuáles pueden ser los sitios críticos, por qué es un punto crítico y qué medida puede realizarse para contrarrestar esto. También se recomienda que se realice un esquema de cada uno de los procesos productivos con que cuente la empresa (Rojas, 2011). Esta etapa incluye un análisis de las operaciones unitarias y balances de masas, siendo una ayuda para la identificación de medidas de ahorro de insumos o materia prima y la minimización en la generación de residuos.

Seguidamente se debe proceder a evaluar la información recopilada para definir cuáles son las áreas o los procesos productivos que presentan oportunidades de mejora para alcanzar una P+L. Para el análisis de esta información se debe tomar en cuenta las causas que ocasionan un problema, las repercusiones económicas y ambientales que acarrea, los costos de reparación de los puntos críticos y las opciones de mejora encontradas. Una vez concluido este proceso se debe priorizar las áreas de trabajo, para lo cual el Centro de Eficiencia Tecnológica de Perú (2005) recomienda tomar en consideración los siguientes aspectos:

- Etapas de mayor generación de residuos y emisiones.
- Etapas con mayores pérdidas económicas.

- Costo de las materias primas y de la energía.
- Cumplimiento con los reglamentos y normas presentes y futuras.
- Costos por la administración de residuos y emisiones.
- Riesgo de seguridad para el personal y el entorno.
- Potencial para reducir o eliminar los cuellos de botella de producción, donde se genera mayor cantidad de residuos y se tienen mayores pérdidas económicas.
- Presupuesto disponible para la realización de las opciones de Producción Más Limpia.
- Capacidad de las empresas para obtener medios de financiamiento.
- Expectativas respecto a la competitividad de la empresa.

Para asignar el orden de prioridad a las oportunidades de mejora encontradas es necesario averiguar la viabilidad económica, ambiental y técnica (Rojas, 2011).

Posteriormente, se realiza el plan de implementación de las opciones de mejora, el tiempo que se ejecutará la medida y la persona responsable, las actividades a realizar, los costos de su implementación y cuál es el ahorro esperado. También se deben seleccionar los indicadores para cuantificar y monitorear los resultados de implementar dicha medida (Centro de Eficiencia Tecnológica Perú, 2005; Rojas, 2011).

La última etapa es el seguimiento y la supervisión de la implementación de las medidas y acciones realizadas, documentación de los procesos y cambios. Y permanecer en la mejora continua en todas las etapas

Algunas de las ventajas (Basappaji & Nagesha, 2013) que tienen la P+L ante las tecnologías al final del tubo son:

- Reduce los costos de tratamiento final.
- Reduce los desechos.
- Reduce y optimiza las materias primas utilizadas.
- Menos problemas con cumplimiento de la legislación aplicable.
- Mejor imagen comercial.
- Soluciona las problemáticas en la fuente.

La aplicación de producción más limpia a procesos está dirigida al uso racional de las materias primas, sustituir sustancias tóxicas, reducción de los desechos, emisiones y consumo eléctrico (Garzón & López, 2008) .

Para conocer dónde son los puntos críticos durante el ciclo productivo, es necesario realizar balances de masa, energía, seguridad, agua, entre otros; toda la información obtenida de esta revisión será útil para reflexionar en las áreas a aplicar herramientas de producción más limpia (Basappaji & Nagesha, 2013; Kim , Thoma, Ulrich, Nutter, & Milani, 2014; Djekic, Miocinovic, Tomasevic, Smigic, & Tomic, 2013).

Los focos de contaminación de la fabricación del queso se dividen en tres (Garzón & López, 2008):

- Residuos sólidos: Los problemas se dan por mala disposición de los residuos, generando taponamiento de las tuberías y malos olores. Los principales residuos sólidos generados provienen de los procesos de embalaje y empaque, mantenimiento y materiales de oficina.
- Emisiones atmosféricas: Generados por el vapor de agua caliente utilizada en la pasteurización de la leche y limpieza. Sin embargo, al ser queseras artesanales; esta componente no será considerada como un punto crítico dentro del estudio.
- Efluentes líquidos: Durante el proceso de la fabricación del queso, los efluentes líquidos son los que generan mayor impacto; siendo necesario darle énfasis a la generación de las aguas residuales y el uso del suero.

El uso del agua durante el proceso es para enfriamiento y limpieza principalmente; de manera que las aguas residuales producidas contienen detergentes, desinfectantes, leche, suero de leche, sal, grasa, proteínas, entre otros (Mirabella, Castellani, & Sala, 2013; Qasim & Mane, 2013).

La cantidad de agua de desecho generada por litro de leche procesada en un día se muestran en el Cuadro 2-3.

Cuadro 2-3. Balance de agua en la producción de queso fresco.

Litros de agua generado/ litro de leche	Autor
8	(Bedoya, 2009)
3	(Garzón & López, 2008)
4	(Consejo Nacional de Producción, 2001)
20	(Kim , Thoma, Ulrich, Nutter, & Milani, 2014)
5	(Karadag, Emre Koroglu, Ozkaya , & Cakmakci, 2015)
5	(Qasim & Mane, 2013)
4	(Carvalho, Prazeres, & Rivas, Cheese whey wastewater: Characterization and treatment, 2013)

Aunque estos valores pueden variar según el volumen de la industria, los equipos utilizados, técnicas de producción más limpia, entre otros (Bedoya, 2009).

En general, la implementación de las técnicas de producción más limpia, van a depender de las barreras a las que se enfrente la quesera. Estas barreras pueden ser del tipo económico, técnico, desinterés, falta de conocimiento, cultural, social, entre otras.

2.3 TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES.

Para el tratamiento de estas aguas se ha incursionado con diferentes sistemas de tratamiento; entre ellos se pueden mencionar los biofiltros, lodos activados, lagunas aireadas, lagunas anaerobias, digestores anaerobios, coagulación-floculación, adsorción, membranas permeables, ozono, procesos de oxidación, entre otros (Estrada, 1993; Carvalho, Prazeres, & Rivas, 2013 (Karadag, Emre Koroglu, Ozkaya , & Cakmakci, 2015)).

2.3.1 Tratamiento Aerobio.

Dentro de los sistemas **aerobios** el que ha presentado mejores resultados son los lodos activados (Carvalho, Prazeres, & Rivas, 2013). Dentro de los requerimientos para optar por un sistema de tratamiento aerobio se encuentran los siguientes (Magaña, 1985; Karadag, Emre Koroglu, Ozkaya , & Cakmakci, 2015):

- Más de una hectárea de extensión.
- Suelo arcilloso, fácil de excavar y con más de 50 metros de profundidad del manto freático.
- Lejano a núcleos habitaciones por la generación de malos olores.
- Mantenimiento periódico, usualmente con un operador fijo.
- El requerimiento de aireación es proporcional a la carga orgánica.
- Requiere adicionar nutrientes.
- Cargas orgánicas bajas.

Al ser la industria de quesos artesanales una actividad familiar y de la categoría pymes, no cuentan con muchos de los requerimientos necesarios para implementar un tratamiento aerobio: además el tratamiento aerobio tiene una serie de desventajas relacionadas a su operación y mantenimiento (Malaspina & et al, 1995). Por esas razones es que la tecnología que se ha usado por excelencia para el tratamiento de las aguas de los sectores industriales

tanto a pequeña como a grande escala son los sistemas de tratamiento anaerobios (Calli & Ali , 2002).

2.4 TRATAMIENTO ANAEROBIO.

2.4.1 Aspectos Generales.

La digestión anaerobia es aquella que no hay presencia de oxígeno y la descomposición de la materia orgánica es llevada a cabo por bacterias anaerobias y facultativas, produciendo gas metano, carbónico, nitrógeno, hidrógeno, amoníaco y sulfuro de hidrógeno (Caicedo, 2006; Ruiz, 2002). Algunas de las ventajas que presenta el tratamiento anaerobio son:

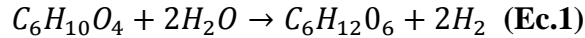
- No requiere electricidad que reducen los costos de operación.
- Menor cantidad de producción de lodos para disposición.
- No genera malos olores, al estar cerrados.
- Resiste altas cargas orgánicas.
- Operación sencilla.
- Bajo requerimiento de nutrientes.
- Requiere poca área superficial.
- Producción de metano que puede ser posteriormente utilizado como fuente de energía.
- Se puede escalar fácilmente.

Dentro de sus principales desventajas se encuentran las siguientes (Pérez & Villegas, 2004):

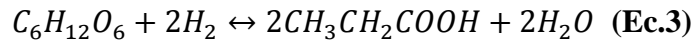
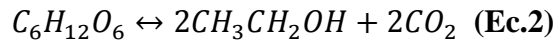
- Generación de malos olores por los ácidos grasos y el ácido sulfhídrico.
- Tiempos de retención largos.
- Funcionamiento bajo pH neutro con adicción de alcalinidad.
- Crecimiento bacteriano lento por la inhibición de los subproductos generados de compuesto tóxicos.
- Tiempo de arranque lento y sensible.
- Es necesario en muchas ocasiones un tratamiento posterior.

La digestión anaerobia consta de cuatro etapas de reacciones químicas que se llevan a cabo por la acción de las bacterias: la hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis.

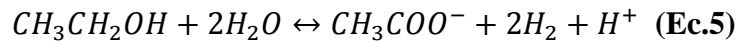
La **hidrólisis** es la etapa donde las proteínas, carbohidratos y lípidos se transforman en complejos solubles mediante la adsorción de agua y la acción de enzimas extracelulares excretas por las bacterias fermentativas (Caicedo, 2006); por ejemplo en la **Ec. 1** se demuestra la hidrólisis de la glucosa en un compuesto más sencillo



En la **acidogénesis** representada por la **Ec 2 y Ec 3**; una vez obtenidos los compuestos en formas más simples, son adsorbidas por la pared celular de las bacterias, y descompuesta por la acción de endoenzimas, generando gases como el dióxido de carbono, ácido láctico, hidrógeno, ácido propiónico, butírico, entre otros (Bedoya, 2009).



Todos los productos generados en la etapa anterior pasan a ser convertidos en ácido acético, dióxido de carbono e hidrógeno por las bacterias acetogénicas en la etapa de la **acetogénesis**, demostradas en las **Ec 4 y Ec 5**.



Por último en la **metanogénesis**, que corresponden a las **Ec 6 y Ec 7**; todos los productos generados se convierten en metano por medio de reacciones reductoras (Caicedo, 2006); las bacterias metanogénicas son las más sensibles a las condiciones del reactor y con un crecimiento más lento (Mrunalini, 2013).



Para un tratamiento anaerobio adecuado es ideal garantizar las siguientes condiciones mínimas (Pérez & Villegas, 2004; Jiménez, 1991; Calli & Ali, 2002):

- Un pH entre 6.5 y 7.5, evitando valores inferiores a 6.2.
- Temperaturas cercanas a 30 °C.
- Ausencia de oxígeno
- Ausencia de sulfuros.

2.4.2 Inóculo.

El lodo granular es la base de los reactores anaerobios (Bermúdez, Rodríguez, Martínez, & Terry, 2003); este debe ser un inóculo apropiado que brinde alta carga orgánica de manera que promueva el crecimiento bacteriano que degradará los sustratos del agua residual (Pérez & Villegas, 2004). El inóculo debe tener una alta sedimentabilidad, de modo que permita la separación entre los sólidos y líquidos.

Este inóculo deberá brindar los siguientes beneficios (Torres, Pérez, Cajigas, Jurado, & Ortiz, 2007):

- Disminuir el tiempo de arranque del reactor.
- Brindar mayor estabilización.
- Alcanzar altas eficiencias de remoción.
- Generar alta actividad metanogénica.

El inóculo de estiércol de vaca o cerdo mezclado con lodo granular incrementó la eficiencia y la producción de metano en las aguas residuales de extracción de yuca (Torres, Pérez, Cajigas, Jurado, & Ortiz, 2007) La ventaja de la adición del lodo granular al estiércol se centra en la disminución de la vulnerabilidad del estiércol solo, con cambios en el sustrato, factores ambientales y de operación; además aumenta la capacidad buffer del sistema (Torres, 2007).

2.4.3 Parámetros de control del proceso.

2.4.3.1 Temperatura.

Esta debe de estar en el rango mesofílico con temperaturas entre los (20-40) °C (Hassan & Nelson, 2012; Pérez & Villegas, 2004), donde representa el mejor desempeño en la digestión anaerobia, sin embargo los reactores anaerobios tienen buena resistencia a los cambios de temperatura siempre y cuando no sobre pase los límites del rango de temperatura (Saleh & Mahmood, 2004). Por encima de los 20 °C es cuando se da la degradación de las grasas (Pérez & Villegas, 2004). Cuando el agua se maneja en el rango psicrófila (0-20) °C se requieren de tiempos de retención más altos, por lo tanto áreas de construcción más grandes y brinda la posibilidad de preservar los lodos por más tiempo sin perder actividad; al contrario cuando el sistema trabaja bajo el rango termofílico (40-75) °C (Saleh & Mahmood, 2004) requiere mucha energía que eleva los costos de operación del sistema de tratamiento (Pérez & Villegas, 2004).

2.4.3.2 pH.

Para un adecuado crecimiento de los diferentes grupos bacterianos el pH debe estar dentro de (6.3-7.8) (Mrunalini, 2013; Sarathi Majumder & Gupta, 2009); esto para permitir el crecimiento de bacterias acidogénicas y metanogénicas.

Las bacterias acidogénicas toleran rangos de pH altos, estas bacterias presentan mejores rendimientos en un rango de pH de (5-6.5) (Saleh & Mahmood, 2004); pero con pH bajo se inhibe la actividad metanogénica y el sistema se acidifica (Caicedo, 2006; Asif Latif, Ghufuran, Abdul Wahid, & Ahmad, 2011). Las bacterias metanogénicas se reproducen entre los valores de pH de (6-8) (Saleh & Mahmood, 2004; Karadag, Emre Koroglu, Ozkaya , & Cakmakci, 2015).

Cuando el pH se encuentra cerca de la neutralidad es donde se desarrolla el sistema carbonático, predominante de las reacciones ácido base de la digestión anaerobia (Pérez & Torres, 2008).

2.4.3.3 Alcalinidad y ácidos grasos volátiles (AGV).

La alcalinidad es la capacidad que tiene el agua para amortiguar ácidos y mantener un equilibrio en el pH, gracias a la presencia de iones de bicarbonato, carbonato e hidroxilo; se cuantifica en mg $CaCO_3/L$ (Caicedo, 2006). Cuando la alcalinidad en el sistema no es suficiente, se da la acumulación de ácidos grasos volátiles (AGV), desplazando la reproducción de bacterias metanogénicas y obligando a añadir neutralizadores alcalinos como bicarbonato de sodio, hidróxido de sodio, cal, bicarbonato de calcio, entre otros (Saleh & Mahmood, 2004). Para que el sistema trabaje en equilibrio, es necesaria una concentración mínima de $1000\text{ mg }CaCO_3 /L$ que de la suficiente capacidad buffer para neutralizar la acumulación de AGV (Pérez & Villegas, 2004).

Esto puede conseguirse añadiendo bicarbonato de sodio, que añade alcalinidad al agua sin hacer cambios en el pH bruscos en el sistema, ni genera subproductos o agregados indeseados que interfieran en los procesos físico químicos del sistemas (Saleh & Mahmood, 2004; Pérez & Torres, 2008; Karadag, Emre Koroglu, Ozkaya , & Cakmakci, 2015).

El pH está relacionado a la alcalinidad, indica el punto donde termina la alcalinidad bicarbonática (AP) que se obtiene al titular hasta un pH de 5.75; e inicia la alcalinidad equivalente a la acumulación de ácidos (AI), obteniéndose al titular hasta un pH de 4.3. La alcalinidad total (AT) es la suma de ambas (Pérez & Torres, 2008).

Para obtener estabilidad en el sistema, la alcalinidad asociada a los AGV no debe superar la alcalinidad por bicarbonatos, para que el sistema no se acidifique. Cuando esto sucede significa que los AGV no están siendo consumidos por las bacterias metanogénicas a la

misma velocidad con que las bacterias acidogénicas están produciéndolos, por lo que se acumulan y hacen descender el pH (Pérez & Torres, 2008).

Algunos de los parámetros para controlar la alcalinidad de un sistema son los siguientes (Pérez & Torres, 2008):

- La relación entre AI/AT debe estar en el rango de (0.20-0.40) para que no exista una sobrecarga del sistema.
- Valores inferiores a 0.3 para la relación AI/AP.
- El índice alfa (AP/AT) debe estar entre el rango de (0.5-0.7).

2.4.3.4 TRH.

El tiempo de retención (TRH) es un parámetro fundamental para la eficiencia de todo sistema de tratamiento de agua residual. El TRH es el tiempo que el agua del influente permanece dentro del reactor (García De Las Heras, Lopetegui Garnika, Soroa del Campo, & Almandoz Pereira, 2005), está dado por la fórmula $TRH = V/Q$ Ec. 8, donde V es el volumen del reactor en m^3 y Q es el caudal del influente en m^3/d ; además debe de permitir una producción de lodos suficiente para que el proceso sea estable.

El tiempo de retención hidráulico, va estar relacionado con los objetivos de la digestión anaerobia (Pérez & Villegas, 2004); El tiempo de retención óptimo está entre los (2-7) días, para que se dé una fermentación proporcionada entre las bacterias acetogénicas y metanogénicas es de 2.6 días. (Hassan & Nelson, 2012; Calli & Ali , 2002).

2.4.4 Descomposición del efluente.

Grasa: La grasa presente en la leche es un 97% compuesta de triglicéridos, el resto son fosfolípidos, vitaminas (E, D, A y K). El proceso de descomposición de las grasas inicia con la hidrolización de las grasas por la acción de las bacterias acetogénicas produciendo glicerol y ácidos grasos libres; por la misma acción acetogénicas, el glicerol se descompone a acetato, acetyl coenzima a, y cadenas cortas de ácidos grasos. Este ciclo se repite hasta que todos los ácidos grasos libres se hayan descompuesto en acetyl coenzima a o propionil coenzima a que luego es descompuesto a acetato, hidrógeno y dióxido de carbono como productos finales. La producción de ácidos grasos insaturados generan inhibición en la producción de metano y de las bacterias anaeróbicas (Hassan & Nelson, 2012).

Lactosa: La descomposición de la lactosa se da por producción de diferentes sustancias intermedias tales como etanol, acetato, ácido láctico, ácido butírico y ácido propílico; luego son descompuestos por la acción de bacterias acetogénicas a ácido acético, teniendo como producto final metano y dióxido de carbono. La acumulación de los productos intermediarios, afecta el desempeño microbiológico y con ello la producción de metano y acumulación de ácido grasos volátiles (Hassan & Nelson, 2012).

Proteína: La descomposición de las proteínas es la que requiere de más tiempo y de aclimatación de los lodos anaerobios. En la Figura 2-1 se puede ver a groso modo la descomposición de las proteínas.

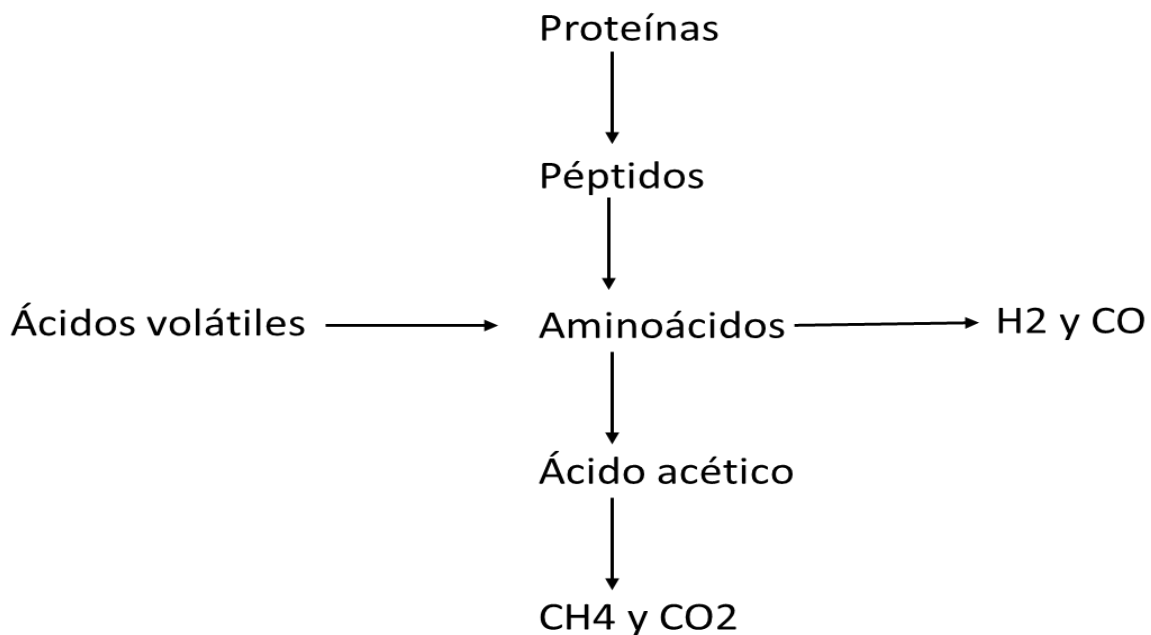


Figura 2-1. Degradación anaerobia de las proteínas de la leche.

Fuente: (Hassan & Nelson, 2012)

El tratamiento anaerobio es apropiado para la descontaminación de las aguas residuales de industrias lácteas por su carga orgánica alta. El sistema más comúnmente utilizado para la industria lechera y quesera son los Reactores Anaerobios de Flujo Ascendente (RAFA) (León, 2005), sin embargo también destacada los filtros anaerobio, con recirculación y los híbridos anaerobios. A continuación en el Cuadro 2-4, se presenta una comparación de los sistemas de tratamiento anaerobio utilizados en los últimos 20 años para los influentes de las industrias queseras y de productos lácteos; dónde se comprueba que el tratatamiento anaerobio ha sido ampliamente utilizado y es viables técnicamente para la descontaminación

de las aguas residuales de este tipo de industrias; alcanzando valores de remoción entre (90-97) %. Los autores recomiendan utilizar tiempos de retención entre 1 y 4, para cargas orgánicas semejantes a las aguas residuales de las queseras de Santa Cruz de Turrialba.

Cuadro 2-4. Comparación de los parámetros operacionales HRT y DQO para el tratamiento anaerobio de influentes lecheros y queseros.

Tipo de agua residual	Reactor	HRT (días)	DQO (g/L)	Eficiencia reducción DQO (%)	Referencia
Agua residual de industrias de lácteos	RAFA	1.30	10.10	97	(Bedoya, 2009)
	RAFA	0.7	2.05	90	(Gutierrez, Enemma, & Polanco, 1991)
	RHA	8.00	16.50	95	(Saleh & Mahmood, 2004)
	RHA	1	1	80	(Belancon, Fuzzato, Gomes, Cichello , & Pinho, 2010)
	RHA	1.9	5.34	97	(Strydom, Britz, & Mostert, 1997)
	RHA	1.00	60.00	97	(Najafpour, Hashemiyeh, Asadi, & Ghasemi, 2008)
	FAFA	2	7.5	90	(Karadag, Emre Koroglu, Ozkaya , & Cakmakci, 2015)
	FAFA	3.5	7.5	95	(Gannoun , Khelifi, Bouallagui , Touhami, & Hamdi, 2009)
Agua residual de fabricación de quesos con suero	RAFA	7.00	5.00	97	(Malaspina & et al, 1995)
	RSD	4.00	2.00	98	(Carvalho, Prazeres, & Rivas, 2013)
	RSDA	0.30	6.00	90	(Mockaitis, Ratusznei, Rodrigues, Zaiat, & Foresti, 2006)
	FAFA	10.00	3.30	90	Zayed and Winter, 2000
	FAFA	3.5	12.5	98	(Gannoun, Khelifi, Bouallagui, Touhami, & Hamdi, 2008)
	RAFA	5.00	21.30	97	(Yan, Lo, & Liao, 1990)
	RAFA	6.95	41.00	97	(Kalyzhnyi, 1997)
	RAFA	6.1	51.00	92	(Kalyzhnyi, Perez Martínez, & Rodríguez Martínez, 1997)
	RAFA	8.05	16.50	93	(Kalyzhnyi, Perez Martínez, & Rodríguez Martínez, 1997)
	RAFA	2.00	1.62	89	(Carvalho, Prazeres, & Rivas, 2013)
	RAFA	6.10	51.00	94	(Carvalho, Prazeres, & Rivas, 2013)
	RAFA	6	37.00	98	(Gavala, Kopsinis, Skiadas, Stamatelatos, & Lyberatos, 1999)
	RAFA	6	60	92	(Gavala, Kopsinis, Skiadas, Stamatelatos, & Lyberatos, 1999)
	RAFA	2.2	57.05	96	(Ergüder, Tezel, Güven, & Demirer, 2001)
RHA	2.00	11.00	95	(Calli & Ali , 2002)	

RAFA: Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente, RHA: Reactor Híbrido Anaerobio, FAFA: Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente, RSD: Reactor Secuencial Discontinuo, RSDA: Reactor Secuencial Discontinuo Avanzado

2.4.5 Reactores Anaerobios de Flujo Ascendente.

Esta es una tecnología de Bélgica y Holanda, diseñada por el Dr. Gatze Lettinga, para tratar agua residual con alta carga orgánica. Su diseño consiste en una única zona de reacción donde se depositan en el fondo los sólidos con mayor capacidad de sedimentación y utiliza un flujo ascendente. Las bacterias forman gránulos de lodo donde se adhieren y degradan la materia orgánica presente. (Bedoya, 2009).

Ha sido ampliamente utilizado en efluentes industriales, como destilerías, procesos de alimento, municipios, entre otros (Saleh & Mahmood, 2004).

Entre las ventajas que presenta están (Bedoya, 2009):

- Cargas orgánicas altas de hasta 20 000 mg/L.
- Bajo requerimiento de energía, construcción simple y operación sencilla.
- Permite operar con velocidades de carga orgánica altas.
- Poca pérdida de presión en el lecho.
- Permite cargas intermitentes con conservación del lodo.

Entre las principales desventajas del reactor anaerobio de flujo ascendente son (Mrunalini, 2013):

- Inhibición de las bacterias con diferentes compuestos.
- Requiere un tratamiento secundario.
- Tiempo de arranque lento.
- Pueden darse una mala distribución del influente, quedando zonas sin alimentarse.
- Sensibilidad a los factores de sólidos sedimentables, grasas, aceites y acidez.

Para los RAFA en los influentes de queseras, se ha demostrado que el reactor necesita adición de una sustancia que compense la baja alcalinidad característica de las aguas contaminadas con suero de queso, para alcanzar la estabilidad durante la operación. El agua residual de la producción de queso suele acidificarse hasta llegar a pH de 4.5; siendo necesaria la adición de una disolución tampón que neutralice la acidez (Bedoya, 2009).

Sin embargo cuando el reactor se estabiliza y el inóculo haya madurado no es necesario continuar con la adición de la sustancia alcalina, pues disminuirá la eficiencia del sistema (Gutiérrez, 1991; Vlyssides, Barampouti, Mai, & Tsimas, 2009).

Los RAFA trabajan con velocidades de cargas típicas que varían entre los (5-30) $kg\ DQO/m^3d$ y tiempos de retención entre los 0.2 y los 2 días; sin embargo esto varía mucho dependiendo de los requerimiento del agua residual (Ruiz, 2002).

Un estudio realizado por (Gannoun , Bouallagui, Touhami, & Hamdi, 2004), logró demostrar que es posible arrancar en tres meses un reactor anaerobio de flujo ascendente para aguas de queseras con temperaturas de aproximadamente veinticuatro grados centígrados; siempre y cuando la baja alcalinidad del influente sea tratada. (Kalyzhnyi, Perez Martínez, & Rodríguez Martínez, 1997) . Logrando mantener los valores de acetato de 0.25 g COD/L durante el arranque del reactor, obteniendo buenos resultados en la granulación y estabilización del lodo.

2.4.6 Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente.

Los filtros anaerobios de flujo ascendente (FAFA), fueron desarrollados y probados en Brasil por Young y McCarty; es una tecnología donde el crecimiento bacteriano se da en un medio de soporte fijo que garantice la retención de los sólidos, como piedra, cerámica, cáscaras de alimentos, entre otros (Shehar, 2006) . El coeficiente de vacío del medio filtrante debe ser alto para evitar obstrucciones tempranas en el filtro y en algunas ocasiones es necesario un tratamiento primario para bajar la materia suspendida del influente (Pérez & Villegas, 2004)

Al igual que con la tecnología RAFA, el efluente entra desde la parte inferior del reactor, forzando a los sólidos a depositarse en el filtro. Han sido utilizados como tratamiento secundario en aguas domésticas, aumentando la eficiencia de la depuración (Alvarado, 2011).

Dentro de las ventajas que presentan los FAFA's se encuentran las siguientes (Pérez & Villegas, 2004; Gannoun , Bouallagui, Touhami, & Hamdi, 2004; Karadag, Emre Koroglu, Ozkaya , & Cakmakci, 2015):

- Soportar cargas orgánicas altas de hasta 15000 mg/L y mantener su estabilidad.
- Fácil construcción, fácil de arrancar y re arrancar.
- Operación sencilla, sin mezcla mecánica.
- Su flujo puede ser ascendente o descendente.
- Pueden soportar cambios en la carga orgánica.

- No necesitan recirculación de efluente o de sólidos.

Entre las desventajas (Estrada, 1993) que presenta están:

- La sensibilidad a sólidos sedimentables.
- El material de soporte puede ser caro.
- Riesgo de atascamiento con algunos materiales de soporte.
- Alta concentración de sólidos suspendidos dependiendo del espesor del medio filtrante.

El rango de soporte de carga orgánica para el FAFA varía entre los $(10-20) \text{ kg DQO} / \text{m}^3 \text{d}$

(Ruiz, 2002) con tiempos de retención entre 1 y 3 días; en influentes de quesera han demostrado eficiencias por encima del 90 % en la remoción de la carga orgánica con un tratamiento posterior (Gannoun, 2004) con valores de alimentación cercanos a 3.5 g DQO/L*d, con tiempos de retención de 4 días y un pH de 7,3 y de un (60-80) % como tratamiento individual (Pérez & Villegas, 2004).

2.4.6.1 Medio de soporte filtrante.

Para asegurar un buen funcionamiento del reactor híbrido se debe escoger un material de relleno adecuado para la fase del FAFA; este material debe retener los sólidos, ser resistente, biológico e inerte, liviano, poseer superficie porosa libre de contacto y ser barato (Torres, 2004). Entre sus principales funciones se encuentran las siguientes:

- Facilitar un flujo uniforme.
- Acumular la biomasa.
- Que sea ligero.
- Tener gran área superficial.
- Ser una barrera física que evite el arrastre en el sistema del material floculante.
- Separar los sólidos de los gases.
- Facilitar un flujo homogéneo en el reactor.

En Colombia se probó que usando la cáscara de coco, se obtuvieron remociones entre el 70% y el 80% en un FAFA para la descontaminación de aguas residuales de una industria de extracción de yuca. El influente de esta industria de extracción de yuca presenta niveles de DQO de 4500 mg/L, pH de 4.2 unidades; similares a las características físico-químicas de las aguas residuales de una quesera (Torres, 2004).

Estudios demostraron que usando anillos de cerámica se obtienen eficiencias de un 65% con un solo paso para el tratamiento de efluentes de destilería con una DBO entre (25000-45000) mg/L y con niveles de pH inferiores a 5 (Riviera, Gonzáles, Castro , Nieves, & Guerrero, 2002).

Los materiales más comúnmente utilizados como soporte inerte han sido la arena y la piedra; otros menos tradicionales han sido los anillos de plástico, conchas marinas, recortes de llantas, de cerámica, de bambú, carbón activado granular y otros de baja densidad (Kato, 1999; Karadag, Emre Koroglu, Ozkaya , & Cakmakci, 2015)

Los tubos de plásticos son uno de los materiales utilizados de preferencia; pues son resistentes a la corrosión generada en los tratamientos anaerobios, no conducen electricidad, son resistentes, flexibles, de fácil mantenimiento, inhiben la proliferación de hongos y hongos, además son accesibles. (Pérez & Villegas, 2004).

2.4.7 Reactores Híbridos.

Un reactor híbrido es todo aquel que esté constituido de diferentes procesos anaerobios (Ruiz, 2002). Los más utilizados son los que combinan la tecnología RAFA-FAFA; donde ambas tecnologías presentan diferentes debilidades durante el arranque, maduración y operación. Es por esto que en Brasil y Colombia (Pérez & Villegas, 2004) se han venido trabajando con esta combinación; utilizando el nombre de RAFA con biofiltro de acabado anaerobio (Jímenez, 1991).

Los RH han promocionado buenos resultados para la descontaminación de aguas residuales de tipo industrial pues reúne lo mejor de ambas tecnologías al haber una mejor retención de la biomasa; además son utilizados en influentes de aguas residuales de industrias alimenticias (Ruiz, 2002; Lopetegui, Soroa, Almandoz, & García, 2005).

Los reactores híbridos (RH) son una mezcla de un RAFA y un FAFA, es rectangular y de fondo plano; las relaciones que se utilizan son de (30-60) % del reactor es para el RAFA y un (70-40) % para el FAFA. Los reactores híbridos favorecen el crecimiento de microorganismos en el manto de lodo, en el material de empaque y los espacios vacíos existentes.

Según Jiménez (2008) el reactor que muestra mejores eficiencias tiene un volumen similar para los dos procesos; es decir 50% RAFA y 50% FAFA, sin favorecer ninguno de los dos.

2.4.7.1 Estructura de un reactor híbrido.

Compuesto por los procesos involucrados dentro de un RAFA y un FAFA en el mismo tanque; con la siguiente distribución (Pérez & Villegas, 2004) :

- Zona de alimentación: el sistema hidráulico compuesto de tuberías que aseguren la buena distribución del caudal en el reactor garantizando una buena homogenización de las aguas, evitando las zonas muertas dentro del reactor.
- Zona de Digestión: estará compuesto por un manto de lodos y una zona de empaque. En esta zona se dan las interacciones del agua residual con el manto de lodos del RAFA y la ventaja de la adhesión del empaque separando de manera más eficiente las fases y disminuyendo la aparición de organismos patógenos. Esto permite que la materia orgánica que no fue degradada en la fase RAFA se trabaje en la fase FAFA, asegurando mayores eficiencias de remoción.
- Zona de Sedimentación: es un espacio libre que le brinda una altura extra al tanque como borde libre en caso que se generen sólidos sedimentados en la parte superior del reactor; aunque debido a la configuración, no se espera retención de sólidos.
- Zona de recolección de Biogás: La recolección se da con una mampara resistente a la corrosión y que además permita la salida del gas.

2.4.7.2 Ventajas de los reactores híbridos.

Entre las ventajas que presentan los reactores híbridos se pueden mencionar las siguientes (Pérez & Villegas, 2004):

- Ocupa una menor área de construcción por su forma geométrica.
- Se puede construir parcialmente enterrado.
- El FAFA brinda mayores velocidades de ascensión, disminuyendo la pérdida de biomasa por arrastre.
- La purga es alta, dando un equilibrio de la eficiencia del reactor.
- Además se suman todas las ventajas proporcionadas por las tecnologías RAFA y FAFA individualmente.

Un estudio realizado en Boloña, Italia con un sistema híbrido en queseras obtuvo buenos resultados en el control del proceso, obteniendo una mezcla completa homogénea en el reactor, soportando cargas orgánicas de hasta 10 000 mg/L, sin adición de sustancias alcalinas para mantener el pH estable entre 6.5-6.7 (Malaspina & et al, 1995)

Estas experiencias ratifican que un reactor híbrido es una buena opción para el tratamiento de aguas residuales industriales, con alto contenido en grasas, aceites y compuestos fácilmente acidificables (Calli & Ali , 2002).

3 METODOLOGÍA

3.1 ANÁLISIS DE LA GESTIÓN DEL AGUA DE LAS CINCO QUESERAS ESTUDIADAS.

El análisis de la gestión del agua se realizó con cinco queseras de Santa Cruz de Turrialba en Cartago, Costa Rica. Esta es una zona rural ubicada en las faldas del volcán Turrialba (ver Figura 3-1), con una población de 3 208 personas (INEC, 2011), ubicada a 1 400 msnm. Es conocida por la fabricación de queso Turrialba y la lechería, siendo estas sus principales actividades económicas. Existen 275 fincas lecheras y 150 plantas queseras (Blanco, 2008).

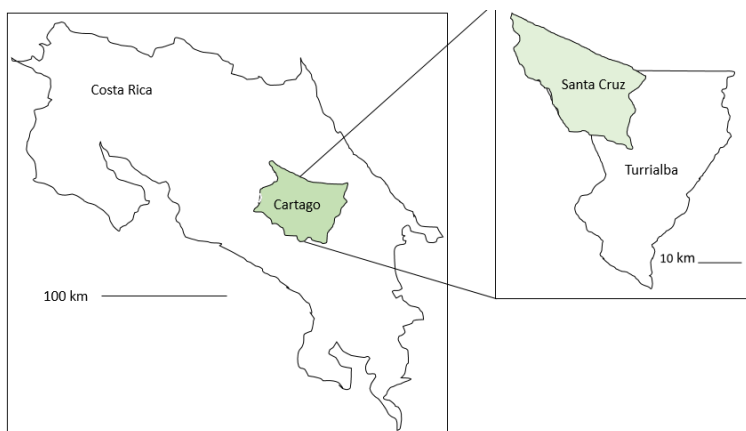


Figura 3-1. Santa Cruz de Turrialba

3.1.1 Visitas de inspección.

Se hicieron enfocadas al uso y manejo del agua y otros aspectos importantes; para ello se realizaron dieciocho visitas a la zona durante los meses de febrero a junio del 2014, para la caracterización de los procesos, productividad, manejo de los residuos líquidos y sólidos, sistemas de tratamiento para las aguas residuales existentes, información general de la quesera, condiciones de higiene y seguridad. En el Cuadro 3-1 se presenta la distribución de visitas en las queseras.

Cuadro 3-1. Distribución de visitas en las queseras artesanales

Quesera	Número de visitas
Finca 1	2
Finca 2	6
Finca 3	6
Finca 4	2

3.1.2 Análisis de la calidad del agua.

Se realizó un muestro de los vertimientos de las aguas residuales generadas en la planta de procesamiento de queso. Las muestras fueron analizadas en términos de parámetros como la DBO₅, DQO, Sólidos suspendidos, Sólidos sedimentables, pH (Denver, OB-10), Turbiedad (Orbeco, TB200) y temperatura. Al agua residual de la Finca 3, además se le hizo una prueba de grasas y aceites (ver Cuadro 3-2); todas acorde al Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. (Eaton, Clesceri, & Greenberg, 1995)

Cuadro 3-2. Pruebas físico-químicas realizadas a los influentes de agua residual de las cinco plantas queseras.

Parámetro	Unidades	Número de método *	Técnica
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	5220-B	Volumetría, Reflujo abierto
Sólidos suspendidos fijos.	mg/L	5240-G	Medidor de oxígeno
Sólidos Suspendidos volátiles	mg/L	2540-E	Gravimétrico
Sólidos totales	mL/L	2540 B	Volumétrico
pH		4500-H+B	pHmetro
Grasas y aceites	mg/L	5520-B	Volumétrico
Turbiedad	NTU	2130-B	Turbidímetro marca y modelo
Alcalinidad Total	mg CaCO ₃ /L	2320-B	Titulación

*Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater

3.2 DEFINICIÓN DE LAS ESTRATEGIAS DE PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA PARA LA MEJORA DEL PROCESO PRODUCTIVO DE LAS QUESERAS ARTESANALES DE SANTA CRUZ DE TURRIALBA.

3.2.1 Diagnóstico de la situación ambiental y productiva.

Para la recolección de la información, se elaboró una guía descrita en el Apéndice 1, la cual fue basada en la normativa INTECO (INTE CTN 02 SC 03) (Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica, 2010), la herramienta de P+L EcoInspector 2.1, QuickScan, principios de la ISO 14001 para sistemas de gestión ambiental e ISO 9001 para sistemas de gestión en calidad. Con la información obtenida de la guía de pre diagnóstico, se aplicó el software de evaluación del potencial de aplicación en P+L, EcoInspector 2.1; software desarrollado por la Universidad de Ciencias Aplicadas de Basilea, basada en los enfoques de proceso de las

normativas ISO 9000: 2001. El software hace una valoración semicuantitativa, donde categoriza los procesos, según el criterio de significancia ambiental y el impacto directo que tiene en el ciclo productivo al ambiente y a la economía; para brindar las áreas con mayor potencial económico y ambiental de implementar producción más limpia. (Hernández, 2013).

Las opciones de mejora fueron formuladas según lo observado en las visitas de inspección, la guía preliminar de diagnóstico y los resultados obtenidos por el EcoInspector; además se consultó la literatura para obtener un panorama más amplio de la gestión en ambiente, seguridad y calidad para la industria quesera.

3.2.2 Selección de una quesera para la evaluación de las oportunidades de mejora y la evaluación del agua residual generada por los reactores híbridos.

Se seleccionó una de las cinco queseras según su sistema de producción, el manejo de residuos líquidos y los resultados arrojados por la herramienta EcoInspector; entre otras razones están:

- Valores de DQO y DBO más altos, simulando la situación más crítica.
- Mayor volumen de producción.
- No ha implementado ningún sistema de tratamiento de aguas residuales.
- Es una quesera muy nueva, lo que da más flexibilidad de trabajar al no existir ideas arraigadas a una tradición.
- Es una quesera que pasteuriza.

Al influente de agua residual de la quesera seleccionada se le realizaron además las siguientes pruebas físico químicas para su caracterización:

Cuadro 3-3. Pruebas físico químicas realizadas a los influentes de las queseras

Parámetro	Unidades	Número de método*	Técnica
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	5220-B	Volumetría, Reflujo abierto
Demanda Biológica de Oxígeno	mg/L	5210-B	Medidor de oxígeno
Sólidos Suspendidos totales	mg/L	2540-D	Gravimétrico
Sólidos Sedimentables	mL/L	2540-F	Volumétrico
pH		4500-H+B	pHmetro

*Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater

3.3 EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DEL TRATAMIENTO RAFA-FAFA PARA LAS AGUAS RESIDUALES DE UNA QUESERA ARTESANAL DE SANTA CRUZ DE TURRIALBA.

3.3.1 Construcción del reactor.

Para la evaluación del reactor anaerobio híbrido, se construyeron dos reactores a escala de laboratorio, con tubos acrílicos. Los reactores tienen un diámetro externo de 0.10 m, altura total de 1.40 m; altura efectiva de 1.20 m (0.1 m en la parte baja del reactor utilizados como falso fondo y 0.1 m en la parte superior), el área total de cada reactor es de $0.0079 m^2$ y un volumen de $0.009 m^3$ (9L); su diseño se presenta en la Figura 3-2. Este diseño es basado en la investigación (Jímenez, 1991; Pérez & Villegas, 2004; Calli & Ali , 2002)

Experimentalmente el Reactor 1 (R1) maneja una relación 50% RAFA-50% FAFA. El Reactor 2 (R2) maneja una relación 40% RAFA-60% FAFA; a la altura total de cada reactor. Ambos reactores cuentan con cuatro puntos de muestreo; para el R1 están a los (30, 60, 90 y 1.20) cm, y a los (25, 50, 85 y 120) cm.

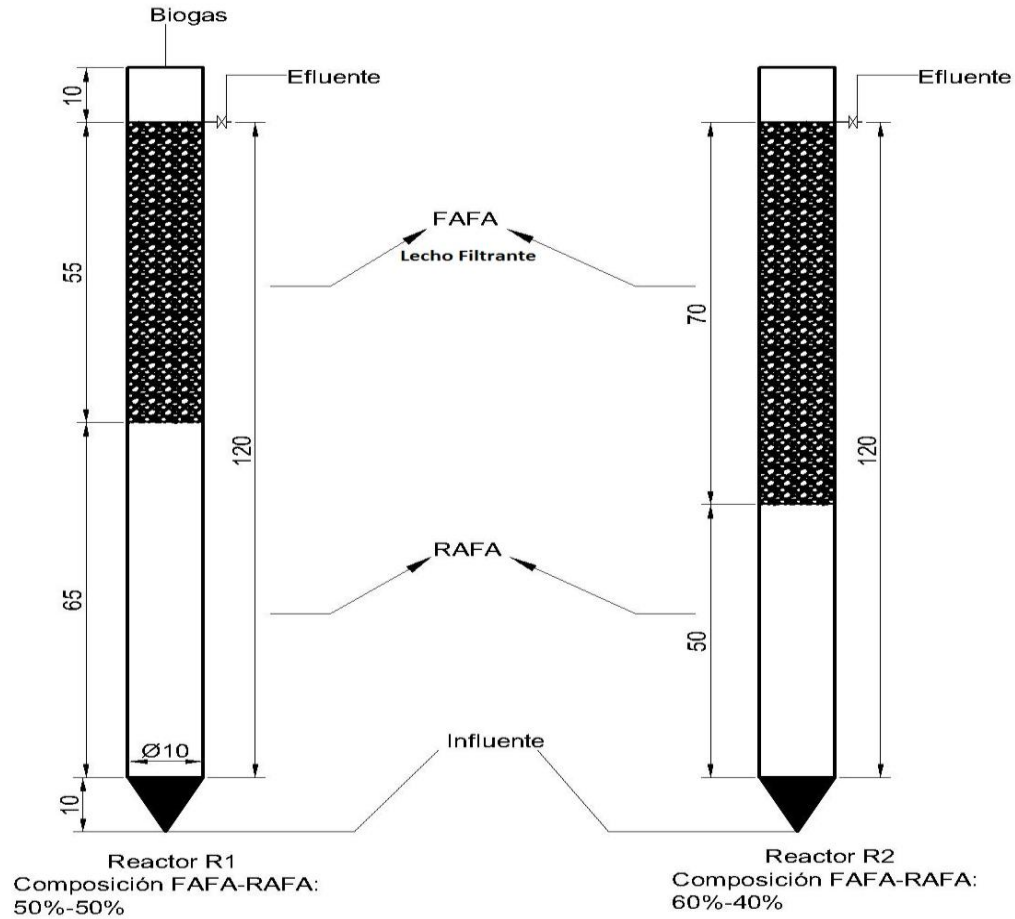


Figura 3-2. Distribución del reactor híbrido.

Ambos reactores se montaron en una estantería metálica como soporte (Figura 3-3); en la parte superior del estante se colocó un tanque de 38 litros con válvulas de salidas para cada reactor; para la alimentación del mismo y para la recolección del agua residual tratada se colocó otro contenedor de la misma capacidad al nivel del suelo.

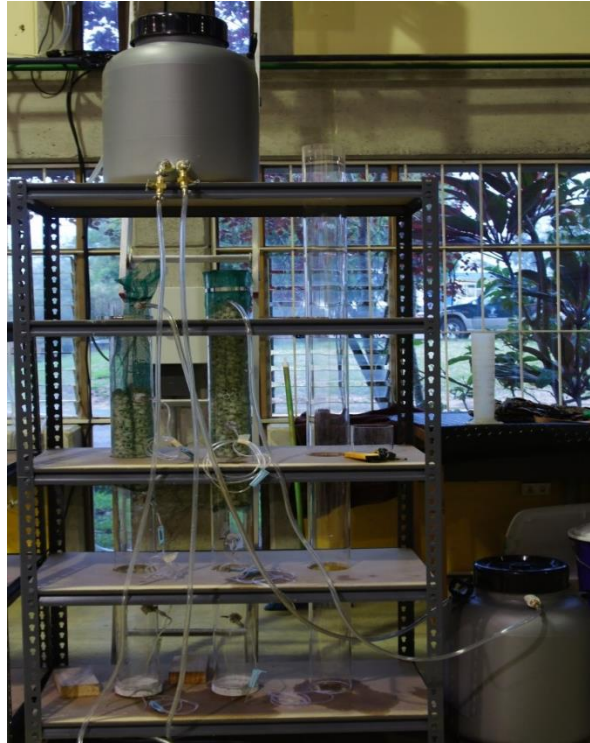


Figura 3-3. Estructura de los reactores.

Estos reactores fueron diseñados y construidos en el Centro de Investigación en Vivienda y Construcción (CIVCO); su alimentación se realizó en tres diferentes locaciones CIVCO, en la Quesera Aguilar y Pereira y en el Laboratorio de Aguas Potables de Ing. Ambiental.

El lecho filtrante del FAFA se fabricó siguiendo la recomendación de Pérez & Villegas, (2004). Se tomaron 54 m de tubería de Policloruro de vinilo clorado (CPVC) de agua caliente, con un diámetro externo de 1.27 cm, cortado en cabos de 1 cm de altura y lijados interna y externamente, de manera que haya una superficie rugosa que facilite la fijación de la película bacteriana. Este medio tiene un área superficial de 0.02 m^2 por cada cabito de CPVC, su porosidad es de un 75% y el área total generada por este medio de soporte es de 72 m^2 . El medio filtrante, se empacó en una manga larga fabricada en malla plástica (Ver Figura 3-4)



Figura 3-4. A: Medio filtrante. B: Material de relleno.

3.3.2 Alimentación é inóculo del reactor.

Se inició la fase experimental con alimentación continua a un caudal de $6.5 \text{ mL}/\text{min}$, para un tiempo de retención de 1 día y una velocidad de carga orgánica de $6.66 \text{ kgDBO}/\text{m}^3 \cdot \text{d}$;

para su apropiada aclimatación. Para este tipo de alimentación se utilizaron las siguientes opciones hidráulicas para la alimentación por gravedad, dado que no se contaba con bomba peristáltica:

- Válvulas de acero a la salida del tanque de alimentación con y sin válvulas de vías de suero a la entrada del tanque receptor.
- Válvulas de vías de suero a la salida del tanque de alimentación con y sin válvulas de vías de suero a la entrada del tanque receptor.
- Válvulas de vías suero solamente a la entrada del tanque receptor.
- Cambios en los diámetros de las mangueras de alimentación y salida: (0.3, 0.63, 1.27) cm
- Difusores de caudal en estereofón y en PVC. (Ver en el apéndice 2).

Esta fase experimental se ejecutó de octubre a diciembre del 2014. Estos mecanismos de alimentación no fueron exitosos por el bajo caudal que se suministraba, además por la calidad del agua residual frecuentemente se obstruían las mangueras de alimentación o las válvulas por lo cual se procedió a alimentación en Batch. La fase experimental de alimentación en Batch comprendió entre los meses de enero a mayo.

La selección del inóculo se hizo bajo las recomendaciones de Torres, Pérez, Cajigas, Jurado, & Ortiz, (2007), quienes reportaron buenos resultados de actividad metanogénica utilizando estiércol de cerdo; además de ello, hay alta disponibilidad en la zona por los criaderos de cerdo. El estiércol de cerdo se obtuvo de la Finca 1, en condiciones frescas; para el estudio se secó en la estufa hasta llevar a peso estable. Las características del inóculo se presentan en el Cuadro 3-4.

Cuadro 3-4. Caracterización del estiércol de cerdo utilizado como inóculo.

Parámetro	Valor
Sólidos Totales (ST) (g/kg)	512.01
Sólidos Volátiles (SV) (g/Kg)	92.20
(SV/ST)	0.18

El agua residual de la quesera seleccionada, se traía una vez a la semana y se almacenaba en refrigeración a 4 °C en el laboratorio de aguas potables de la Carrera de Ingeniería Ambiental.

Para el llenado de cada reactor se alimentó la mitad con agua residual, se le agregó el lodo según la ecuación 12, se instaló el lecho filtrante completando el reactor con agua residual, dejando un borde libre de 10 cm de altura.

3.3.3 Arranque de reactores sin acondicionamiento del agua residual.

Esta fase experimental se realizó con el propósito de evaluar la capacidad de estabilización de los reactores sin adición de producto alcalinizante y evaluar la respuesta natural del sistema. Debido a que son queseras artesanales, cuentan con poco personal y recursos económicos como se mencionó, es una prioridad en el diseño poder economizar en los costos operativos y mantenimiento de un posible sistema de tratamiento.

Los reactores se pusieron en funcionamiento el 20 de enero y por un tiempo de veintiún días se alimentó con un TRH de 3.5. A partir del 9 de febrero se alimentaron cada dos días, hasta el 8 de marzo.

A continuación se presentan las características de alimentación de los reactores anaerobios, el agua con que se alimentaron los reactores se colectaba una vez a la semana de la quesera

seleccionada, para ser posteriormente transportada y almacenada hasta su uso. Considerando una DQO de influente de 2000 mg/L y TRH de 3.5 días:

- Caudal: $0.0027 \text{ m}^3/d$
- Carga orgánica: $0.0050 \text{ kg DBO}/d$
- Carga orgánica volumétrica: $0.5714 \text{ kg DBO}/d * \text{m}^3$
- Carga hidráulica: $0.3429 \text{ m}^3/\text{m}^2 * d$

En este tiempo se monitoreó temperatura, pH cada dos días y DQO a la salida del reactor cada tres días. El 8 de marzo se suspendió la alimentación de los reactores, ya que ambos reactores se acidificaron y se procedió una nueva fase experimental con acondicionamiento bicarbonatado del agua cruda.

3.3.4 Arranque de reactores acondicionando el agua residual.

3.3.4.1 Dosis de alcalinizante para el almacenamiento del agua.

Tras la primera alimentación, el reactor tendió a acidificarse por la baja alcalinidad del agua residual, es por ello que se prosiguió con la siguiente metodología. Se requiere la adición de un alcalinizante para neutralizar la acidez que se genera en el proceso de tratamiento anaerobio, en este caso se utilizó bicarbonato de sodio. Para determinar la dosis de alcalinizante se contó con 9 muestras de 100 mL agua residual cruda con diferentes concentraciones de alcalinizante y tiempo de almacenamiento (Cuadro 3-5).

Cuadro 3-5. Diseño experimental para la prueba de alcalinidad.

Almacenamiento (d)	Concentración NaHCO_3 (g/L)		
	0	2	5
1	A1	B1	C1
3	A2	B2	C2
6	A3	B3	C3

Se midió la alcalinidad por bicarbonatos (AP) titulando con ácido sulfúrico 0.05 N, hasta un pH de 5.75; seguidamente se tituló hasta un pH de 4.3 dando la alcalinidad asociada a los AGV (AI).

Con esto se realizaron los cálculos del índice de alcalinidad total (AT), (**Ec. 8 y Ec. 9**) y los índices de control (AI/AP), (AI/AT), Índice alfa (AP/AT).

Ec. 8: Alcalinidad Total = Alcalinidad a pH 5.75 * 1.25

Donde: 1.25 = Factor que relaciona el porcentaje total de alcalinidad con el de alcalinidad bicarbonática a este pH (80/100)

Ec. 9: Alcalinidad Total = Alcalinidad por bicarbonatos (AP) + Alcalinidad por AGV (AI)

3.3.5 Pruebas de AME con adición de alcalinizante y nutrientes.

Con el fin de analizar las dosis de alcalinidad bicarbonática óptimas para el sistema y los requerimientos de nutrientes, se montaron 5 ensayos de actividad metanogénica, método 2720-B (ver Cuadro 3-6), con la técnica de desplazamiento de gas por hidróxido de sodio (NaOH) al 2% (ver Figura 7-3)

Cuadro 3-6. Diseño experimental de la prueba AME con alcalinizante y nutrientes.

Concentración $NaHCO_3$ (g/L)	Nutrientes	Sin nutrientes
0	-	A
2	B1	B2
5	C1	C2

Cada ensayo se montó con 2.5 L de agua residual de la quesera seleccionada como sustrato, dos tipos de concentraciones de bicarbonato de sodio como alcalinizante, obtenidas del experimento 3.3.6, nutrientes grado reactivo para el agua residual (Cuadro 3-7) y estiércol de cerdo como inóculo; la cantidad de estiércol de cerdo se añadió según la concentración de sólidos de (2.5gSTV/L) dada por la ecuación 12.

Cuadro 3-7. Nutrientes añadidos a la AME.

Nutriente	Marca	Concentración (mol/L)
$CaCl_2$	Merck	0.25
$MgSO_4 * 7 H_2O$	J.T. Baker	0.09
KH_2PO_4	J.T. Baker	0.06
NH_4Cl	J.T. Baker	0.03
$FeCl_3$	Sigma-ALDRICH	0.60

La cantidad de lodo se cuantifico con la **Ec 10**, que relaciona los sólidos totales volátiles.

Ec.10: $C_L = C_D V / C$. Donde: C_L = Cantidad de Lodo (g); C_D = Concentración de sólidos deseada en el reactor (g STV/L); V = Volumen de agua residual (mL); C = Sólidos Totales Volátiles (g/Kg)

Para calcular la actividad metanogénica, se grafican los datos de la producción acumulada de metano (eje y) respecto al tiempo (eje x). Se obtiene la pendiente el punto que se da la mayor la producción del gas. La actividad metanogénica (AME) se calcula con la **Ec 11**

Ec.11: $AME = M * ((24 * 2.66) / (SV * 1000)) : \text{kg CH}_4 / \text{kg SV} * \text{Día}$

Donde: M = Pendiente de la gráfica; SV = Sólidos Volátiles (g)

3.3.6 Estabilización del reactor con alcalinidad y nutrientes.

Se arrancaron los reactores el 7 de abril, se inocularon con estiércol de cerdo en un 10% del volumen total de cada reactor con una dosis de alcalinidad bicarbonática de 30 NaHCO_3 g/L para el acondicionamiento del inóculo y 5 NaHCO_3 g/L de alcalinizante y 1 mL/L de la solución de nutrientes para el sustrato hasta el 20 de abril. Durante la alimentación se utilizó una dosis de 2 NaHCO_3 g/L. Se alimentó por 45 días con un tiempo de retención de 2 días hasta el 19 de mayo, el monitoreo realizado al reactor se describe en el

Cuadro 3-8.

Las características de alimentación del reactor considerando un TRH de 2.3 días y una DQO de influente de 3000 mg/L fueron:

- Caudal: $0.0040 \text{ m}^3 / \text{d}$
- Carga orgánica: $0.0121 \text{ kg DBO} / \text{d}$
- Carga orgánica volumétrica: $1.2857 \text{ kg DBO} / \text{d} * \text{m}^3$
- Carga hidráulica: $0.5143 \text{ m}^3 / \text{m}^2 * \text{d}$

Cuadro 3-8. Muestreo de parámetros de control para tercer experimento.

Parámetro	Frecuencia de muestreo
pH	3 veces semana
DQO (mg/L)	2 veces semana
Alcalinidad	2 veces semana

Los resultados de DQO fueron analizados con estadística descriptiva de promedios, desviación estándar, mínimo y máxima de ambos efluentes; se compararon los valores de efluentes R1 y R2 contra los valores de influentes. El análisis de la alcalinidad se realizó con los índices de control AI/AP, AI/AT y AP/AT, contra los valores recomendados por los autores (Pérez & Torres, 2008).

Durante la alimentación, a partir del 6 de mayo el influente cambió sus características, por recomendación de (Arias A. L., 2015)s, se adicionó alcalinizante hasta llevar el agua a un pH entre los (9-10) para evitar la acidificación del reactor, utilizando una dosis de 30 g NaHCO_3/L .

Finalmente se decidió parar los reactores el 18 de mayo, ya que cambiaron considerablemente las características físico químicas del agua residual con que se alimentaban los reactores; haciendo insostenible para los reactores trabajar con valor de carga orgánica, pH, alcalinidad, entre otros, diferentes para los que fueron diseñados.

4 RESULTADOS Y DISCUSION

4.1 ANÁLISIS DE LA GESTIÓN DEL AGUA DE LAS CINCO QUESERAS ARTESANALES DE SANTA CRUZ DE TURRIALBA.

4.1.1 Visitas de inspección.

En las 5 queseras de la zona de Santa Cruz de Turrialba, existen diferencias en cuanto a la forma de producción del queso y el manejo de sus aguas residuales.

Gracias a las visitas realizadas, se puede hacer una descripción (Cuadro 4-1) donde se caracterizan dos tipos de queseras artesanales: las que pasteurizan y las que no, las queseras que pasteurizan tienen volúmenes de producción de aguas residuales más grandes y cargas orgánicas más bajas que las que no pasteurizan, debido a las dificultades económicas que presentan para el adecuado manejo de los subproductos y desecho.

Cuadro 4-1. Descripción productiva y de planta de 5 queseras artesanales de la zona de Santa Cruz de Turrialba.

Finca	Producción (kg/semana)	Leche (L/día)	Pasteuriza	Productos	Situación Ambiental
1	4100	25 000	Sí	Queso Fresco Turrialba, queso mozzarella, queso maduro con especias y natillas.	Posee trampas de grasas, en mal estado.
2	7000	43000	Sí	Queso Fresco Turrialba, natilla	No hay control en la separación del suero de leche y las aguas residuales, se vierten al pasto.
3	220	200	No	Queso Tomz, Raquette, Gruyere y queso fresco con especias	Tiene tres trampas de grasas y un tanque séptico con drenaje; este sistema no está en buen funcionamiento y son ineficientes por el alto contenido en grasas de las aguas residuales.
4	270	230	No	Queso Fresco Turrialba	El suero se le da al ganado. Las aguas residuales se tratan con biodigestores, se vierten por riego al pasto. Uso eficiente del agua. Implementando el proceso de P+L.
5	3500	20000	Sí	Queso Fresco Turrialba.	Uso eficiente del agua. Cuenta con un sistema de tratamiento por filtros; cumplen con los parámetros del Reglamento de Vertido y Reúso de las Aguas Residuales.

Las queseras que no pasteurizan, generan mayores volúmenes de suero, su proceso (ver Figura 4-1) es más simple, no se le da seguimiento estricto a los tiempos de cada etapa, hay un menor consumo de agua y se pierden más recortes del queso que en las queseras que pasteurizan. En general las queseras sin pasteurización no tienen procesos productivos estandarizados; es realizado por diferentes personas, los rendimientos de la leche varían mucho dependiendo de la persona a cargo; esto les trae problemas en las oscilaciones de calidad y características del queso fabricado, en ocasiones pierden todo el lote de producción, por un error en mediciones u otras razones.

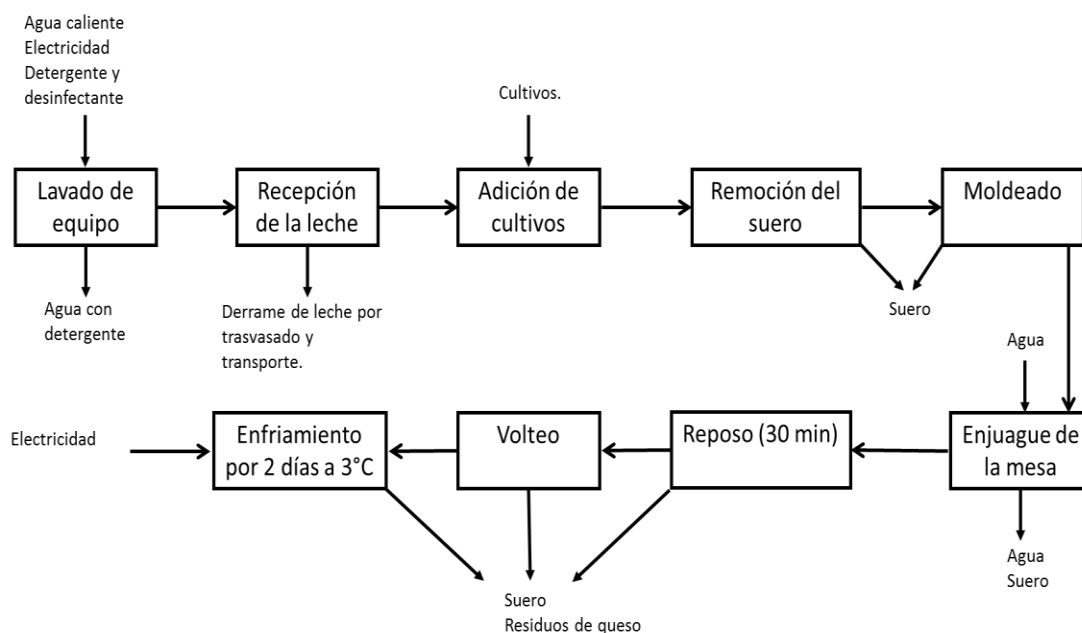


Figura 4-1. Diagrama de proceso del queso fresco Turrialba de una quesera sin Pasteurización

Las queseras que realizan pasteurización tienen procesos más definidos (ver Figura 4-2), se les da seguimiento a los tiempos de permanencia de la leche en cada proceso, procuran no tener pérdida de materias primas y hacen mayor uso de electricidad y agua; a su vez generan mayores volúmenes de agua residual; sin embargo el proceso puede variar de una quesera a otra.

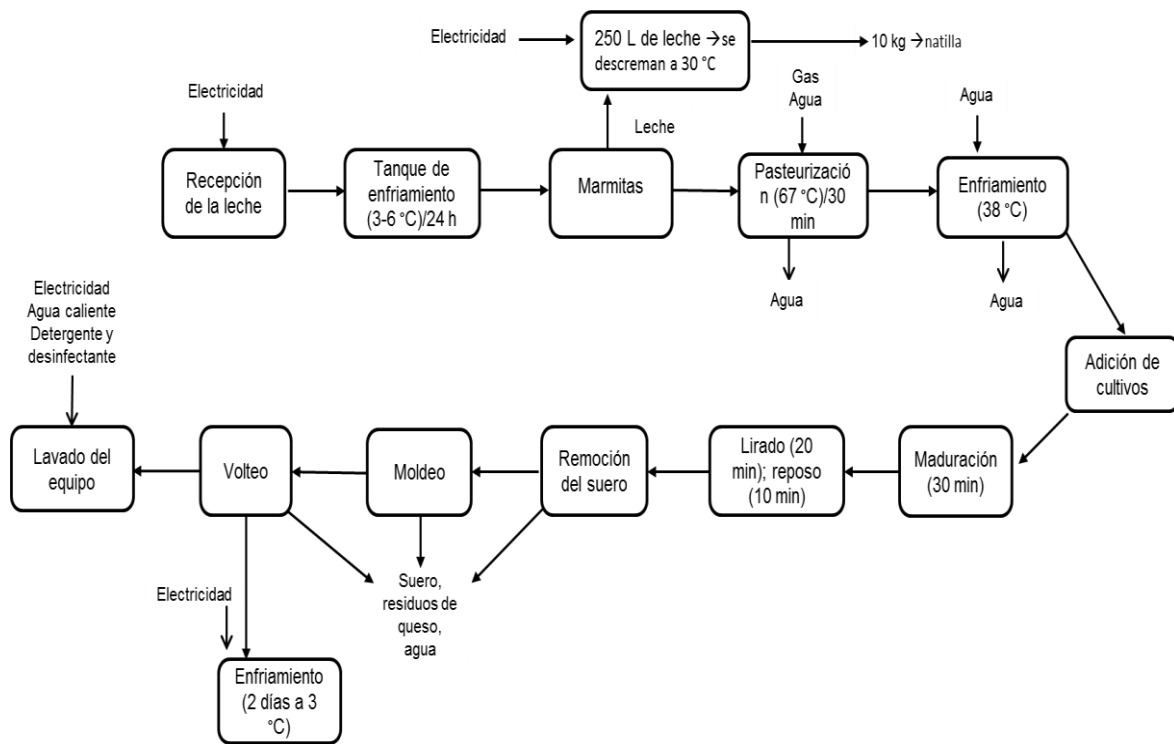


Figura 4-2. Diagrama de proceso de queso tipo Turrialba para una quesera con pasteurización.

Ambas clases o tipos de queseras tienen problemáticas específicas en común, tales como:

- La calidad del agua para el proceso: al ser el agua de naciente, no cuentan con estudios físico-químicos, ni microbiológicos; se ven afectados por las lluvias y erupciones del volcán por el arrastre de sedimentos en el agua y la carencia de purificación.
- Disposición del suero: No se tiene un cuidado de derrames del suero, el transporte se da sin control, las mangueras tienen fugas, hay días que no se les da el suero a los finqueros y se mezclan con las aguas residuales, en otros casos se depositan en el pasto o suelo directamente.
- Manejo de las aguas residuales: No cuentan con asesoría para el apropiado manejo de las aguas residuales; hasta el momento no existe una entidad que les exija un tratamiento de aguas residuales; es por esto que los influentes se depositan en quebradas, pastos y suelo.

4.1.2 Análisis de la calidad del agua

Al haber realizado un solo muestreo de los influentes de agua residual de las queseras, no se puede asegurar si existen diferencias entre las queseras; sin embargo, del muestreo realizado se puede observar que los valores promedios de las características físico químicas del agua residual del proceso productivo de las cinco queseras presentaron diferencias entre sí (ver Cuadro 4-2). Se aprecia que no hubo valores típicos entre los parámetros físico-químicos de las queseras de Santa Cruz de Turrialba; pues los valores varían de una quesera a otra, la quesera 5 presenta el valor mínimo de DQO y actualmente implementa técnicas de producción más limpia y separa el suero del influente.

Cuadro 4-2. Caracterización físico-química de 5 queseras de la zona de Santa Cruz de Turrialba.

(N=1)

Finca	DQO (mg/L)	DBO (mg/L)	SST (mg/L)	S.Sd (mL/L)	pH	Temperatura (°C)	Uso Eficiente del agua
1	1429.00 ± 112.00	744.00 ± 65.00	456.00 ± 1.824	0.40 ± 0.05	6.20 ± 0.01	26.00 ± 0.05	No
2	2301.00 ± 159.00	1230.00 ± 97.00	1278.00 ± 3.94	0.40 ± 0.05	6.50 ± 0.01	24.70 ± 0.05	No
3	7203.00 ± 693.00	3875.00 ± 241.00	843.00 ± 3.79	7.50 ± 0.05	4.30 ± 0.01	20.90 ± 0.05	Sí
4	12926.00 ± 956.00	6260.00 ± 389.00	960.00 ± 3.43	6.00 ± 0.05	6.60 ± 0.01	23.60 ± 0.05	Sí
5	117.00 ± 21.00	62.00 ± 6.00	648.00 ± 2.53	0.60 ± 0.05	6.70 ± 0.01	20.10 ± 0.05	Sí
Promedio	4795.20	2434.20	837.07	2.98 ± 0.05	6.05	23.06	
Desviación Estándar	5276.01	2581.03	312.46	3.48 ± 0.05	0.98	2.50	

Las queseras que presentaron los valores más altos de DQO y DBO no realizan separación del suero en el influente de agua residual; las diferencias de la DQO son de 5 276 mg/L, siendo la presencia del suero un factor determinante en la concentración de la demanda biológica de oxígeno, los sólidos presentes en el agua son en su mayoría sólidos disueltos, la variación en la temperatura se debe a la altitud donde se ubican algunas de la queseras.

Los valores de DBO reportados en la literatura (ver Cuadro 2-1) para aguas residuales que producen queso fresco, varían según la disposición del suero del influente; para las queseras que separan el suero de las aguas residuales, se esperan valores entre los (2000-3500) mg DBO/L; lo cual indica que las queseras evaluadas que tienen procesos de pausterización, no están vertiendo el suero con el agua residual.

4.2 IDENTIFICACIÓN DE LAS OPORTUNIDADES DE MEJORA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA.

4.2.1 Diagnóstico de la situación ambiental y productiva

Al aplicar las herramientas se identificó que las queseras donde se aplican procesos de pasteurización, tienen necesidades similares, siendo sus procesos productivos donde hay un mayor potencial de aplicar PML.

La guía preliminar (ver Cuadro 7-1, apéndice 1), permitió realizar un pre diagnóstico de las queseras, con ella se pudo obtener la siguiente información:

- La disposición de las aguas residuales en cada quesera.
- El uso que se le da al suero de leche, si se dispone para la alimentación de cerdos, o se tira al pasto.
- Los principales gastos, siendo leche la materia prima más costosa para los que no tienen ganado vacuno y la electricidad.
- Las cantidades de leche utilizada por semana rondan entre los (200-7000) litros por día, para una quesera que no pasteuriza y una que pasteuriza respectivamente.
- Los kilogramos de queso producido artesanalmente en la zona a la semana oscilan entre los (118-7000).
- No se cuenta con una estructura organizacional establecida, ni se lleva una contabilidad estricta.
- Los trabajadores no tienen conocimiento ni han recibido capacitación en temas de salud, higiene y seguridad, no existen políticas ambientales.
- Hay poca estandarización de procesos y se acostumbra a tener desperdicios y pérdidas en fallos de producción por la misma razón.

- Las condiciones de las plantas de producción son adecuadas y similares en todas las queseras, entre otros.

En general, tanto las queseras con pasteurización como las que no, presentan similitudes en varios aspectos, a diferencia del uso de vapor para la pasteurización, volumen de ventas y clientela. Ninguna de las dos categorías tiene las bases en gestión del ambiente, salud o calidad de productos y solo dos de las cinco queseras están interesadas en la implementación de técnicas de producción más limpia,

Los resultados obtenidos con el EcoInspector (Figura 4-3), muestra las áreas que presentan mayor potencial económico y ambiental de aplicar P+L. El gráfico presenta en su eje Y el potencial ambiental que tiene un proceso que va desde poco potencial a alto potencial, el X presenta el potencial económico desde poco potencial a alto potencial económico, dividiendo el área total del gráfico en cuatro áreas, aquellos que se encuentren en la esquina superior derecha corresponderán a los procesos que tienen mayor potencial económico y ambiental

Para las queseras con procesos de pasteurización, es al realizar el cuajo; debido a la pérdida de suero, de leche, recortes de queso, entre otros. Las otras áreas con potencial son el proceso de pasteurización y el proceso térmico en general; pues se necesita tener la caldera encendida durante todas las horas de trabajo de modo que brinde la energía necesaria para llegar a la temperatura de vapor y a la temperatura de enfriamiento. Además el agua que se utiliza para el proceso de pasteurización no se reutiliza.

En las queseras que no pasteurizan, (ver Figura 4-4) se puede denotar que el área con mayor potencial económico y ambiental es el proceso de llenado de los moldes. Esto puede deberse a que en las queseras que no pasteurizan son generalmente más pequeñas y sus procesos no están estandarizados por lo que se pierde producto. Otro punto importante es el proceso de realización del cuajo, el cual está relacionado a la falta de estandarización explicada anteriormente.

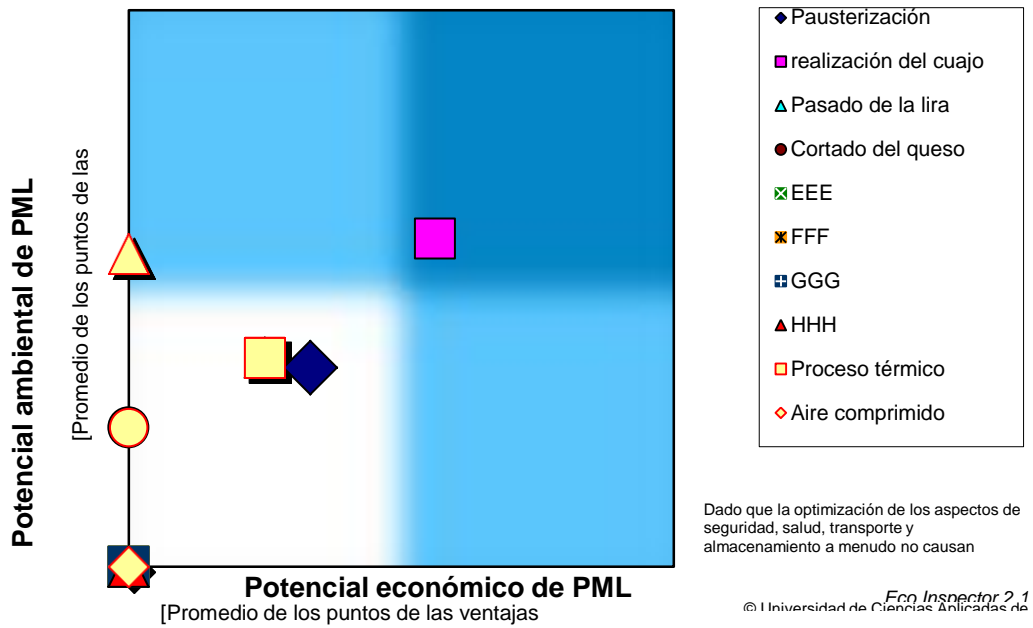


Figura 4-3. Potencial de aplicación de PML en las queseras que pasteurizan. Generado con EcoInspector 2.1

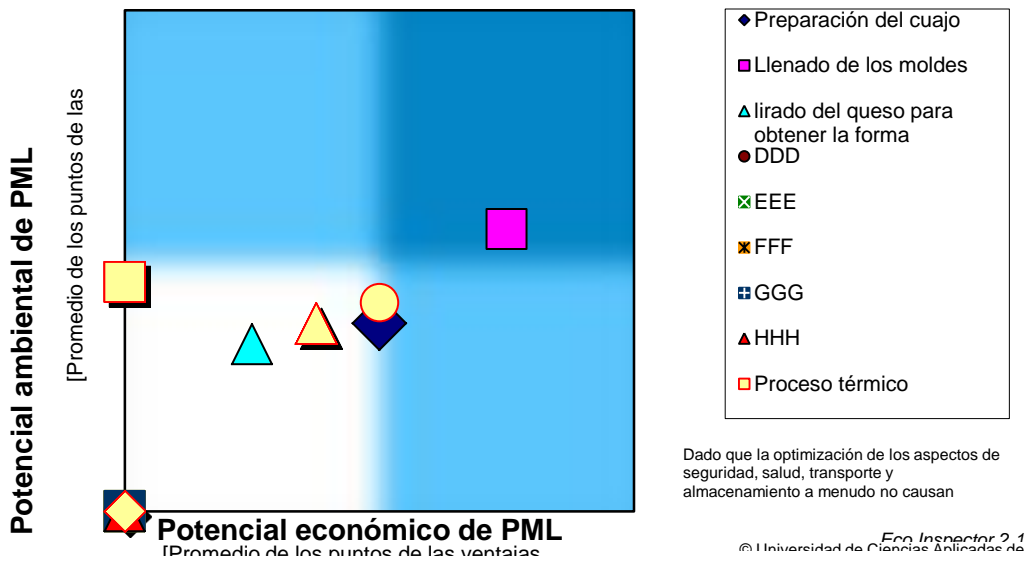


Figura 4-4. Potencial de aplicación de PML en las queseras que no pasteurizan. Generado con EcoInspector 2.1

Es importante destacar que las queseras de esta zona están optando por la certificación de denominación de origen (DO) del queso tipo Turrialba, que se enfoca al origen del queso, donde interactúan factores como el lugar de producción, la historia y la tradición; siendo parte de una herencia cultural (Granados Rojas & Álvarez López, 2007). Para optar por la DO para producir queso Turrialba, es necesario mejorar los aspectos de inocuidad del queso, condiciones físicas, sanitarias, eficiencia y el proceso de fabricación en las queseras artesanales, de modo que tengan acceso a un mercado competente y asegure la calidad del producto (Granados Rojas & Álvarez López, 2007). Por lo tanto, se esperaría que la implementación de estas herramientas ayude a obtener un ahorro de los insumos que se refleje en un beneficio económico, responsabilidad con el ambiente, mayor organización y control de las actividades, mejora de la imagen de la empresa y por último le abrirá las puertas a la certificación DO.

4.2.2 Aplicación de las herramientas de PML en las industrias queseras artesanales de Santa Cruz de Turrialba.

Con los resultados obtenidos, se plantearon las siguientes recomendaciones a trabajar en los aspectos críticos que afectan el desempeño ambiental y productivo de las queseras artesanales estudiadas.

4.2.2.1 *Uso del agua:*

Las queseras que pasteurizaban hacen un uso más eficiente del agua que las que no pasteurizaban (ver Cuadro 4-3), teniendo una relación de litros de agua utilizados por litro de leche menor a las queseras que no pasteurizan.

En el proceso de pasteurización se utilizan volúmenes altos de agua para enfriamiento; por lo que se esperaba que los valores de las pruebas físico-químicas de sus influentes de agua residual fueran menores que los valores de las queseras que no pasteurizan.

Cuadro 4-3. Relaciones de volúmenes generados en la producción del queso para las queseras que pasteurizan y no pasteurizan.

Tipo de Quesera	Agua utilizada (L de agua / L de leche)	Disposición de suero (L de suero/ día)	Disposición final de (m ³ AR/ día)
-----------------	--	---	--

Pasteuriza	3.8	2400	27
No Pasteuriza	7.5	170	1.5

Dentro de las opciones de mejora encontradas para el uso eficiente del agua se encuentran (Consejo Nacional de Producción, 2001):

1. Utilizar mangueras con cierre automático, ya que permanecen abiertas durante todo su uso, inclusive cuando no se necesitan.
2. El ángulo de los pisos y de las tuberías sea suficiente para permitir el correcto drenaje de los líquidos. El desagüe en el plantel debe de estar en el centro con un ángulo de inclinación que asegure que los líquidos drenen hacia el centro.
3. Que el agua que se utiliza para la fabricación de quesos cuenta con estudios organolépticos ni físico químicos que la caractericen. Es común que el agua utilizada provenga de nacientes y en ocasiones el lote de producción sale defectuoso, especialmente en los meses de invierno; por lo que se cree que puede deberse al arrastre de sólidos en el río. Es por esto que se recomienda realizar los estudios necesarios que aseguren la fuente de agua utilizada e instalar un filtro que retenga los sólidos.
4. Es necesario la implementación de un sistema de tratamiento para las aguas residuales generadas; debido a la alta carga orgánica asociada a la producción del queso.
5. La reutilización del agua proveniente del proceso de enfriamiento luego de la pasteurización. Se puede almacenar en tanques para ser reutilizada posteriormente en el lavado de pisos o implementos utilizados.
6. Recircular el agua de enfriamiento mediante la recuperación de la condensación.
7. Evitar jabones con fosfatos.
8. Establecer horarios de limpieza.
9. Realizar revisiones periódicas de fugas, grifos, manejo del agua por parte del personal y enjuague.
10. Colocar un micromedidor de agua para su cuantificación.

4.2.2.2 Registros

Llevar un control administrativo es un aspecto importante en las prácticas de producción más limpia. A su vez, la estandarización de los procesos es indispensable para minimizar fallos y pérdidas en la producción.

La documentación es una herramienta eficaz de autoevaluación, se deben documentar las metas a cumplir, objetivos, mejoras realizadas, registros de producción, reportes

operacionales, diseño, planos, procesos, pago de los servicios, balance de flujos del negocio, entre otros.

Además es necesario contar con un sistema de evaluación del desempeño de la compañía. Algunas de las herramientas a utilizar son (Arias A. , 2013):

- Informes ambientales, económicos y productivos regulares.
- Sistemas de Gestión Ambiental, como ISO 14001 e ISO 9000.
- Cumplimiento con la legislación ambiental nacional.
- Análisis de riesgos y debilidades.
- Garantías de cumplimiento.
- Prevención y minimización de los residuos de contaminación.
- Salud e higiene
- Indicadores de cumplimiento de gestión e Indicadores de cumplimiento operaciones.

4.2.2.3 Residuos sólidos

Para las queseras que no pasteurizan, el área con mayor potencial económico y ambiental es el proceso de llenado de los moldes. Esto puede deberse a que en las queseras que no pasteurizan son generalmente más pequeñas y sus procesos no están estandarizados por lo que se pierde producto constantemente. En el llenado de moldes se pierden recortes del queso y se da una mala disposición del suero de leche; seguido de esto están las variaciones en el proceso de realización del cuajo.

Las grasas generadas son un problema para el posterior tratamiento de las aguas residuales; éstas interfieren en la descomposición del agua acidificándola, haciendo que el tratamiento se vuelva complejo.

Dentro de las opciones de mejora encontradas para la reducción de los residuos sólidos se encuentran (Consejo Nacional de Producción, 2001):

- El uso de mallas para la retención de sólidos antes de la entrada a tuberías de desagüe, impidiendo el atascamiento de los sólidos en la tubería, la generación de malos olores, aumenta la eficiencia del sistema de tratamiento de aguas residuales y trampas de grasas, y el retorno de las aguas al plantel de producción. Utilizar una malla además brinda una cuantificación de la cantidad de producto que se está perdiendo, concientizando sus procesos y motivando a buscar la mejora continua.
- La reutilización de las grasas es viable para su posterior utilización en la fabricación de jabones, cera para pisos, muebles, zapatos,

- Implementar la separación de residuos según su clasificación a nivel gerencial y productivo.
- Estandarizar las medidas de plástico a utilizar para el empaque del queso, con el fin de reducir la generación de plástico.

4.2.2.4 Uso de la energía

El proceso térmico tiene gran potencial económico y ambiental de aplicar PML; las áreas con más oportunidades de mejora son el proceso de pasteurización y el proceso térmico en general, ya que se necesita tener la caldera encendida durante todas las horas de trabajo, y se utiliza bunker o gasolina que aporte la energía requerida para llegar a la temperatura de vapor, por lo que se recomienda sustituirlo por diésel que brinda mayor eficiencia y genera menos emisiones de dióxido y monóxido de carbono que el bunker (Environmental Protection Agency, 2000) .

Los procesos que requieren un mayor consumo de energía son la pasteurización y la refrigeración; por la importancia que representa no pueden ser modificados; sin embargo se recomienda hacer una revisión periódica para evitar fugas, pérdidas de energía y la optimización; estas medidas reducirán a su vez el consumo de energía.

Otras medidas que se pueden aplicar son:

- Utilización de luz natural.
- Utilizar bombillas de bajo consumo.
- Mantener apagados los equipos cuando no se estén utilizando.
- Optimización de las rutas de entrega.

4.2.2.5 Subproductos generados

La reutilización del suero es una actividad con alto potencial económico y ambiental de implementar técnicas de producción más limpia; el suero de leche es considerado como un desecho, de manera que se destina a la alimentación de ganado ovino y porcino (Villegas, 1995), o es vertido en cuerpos de agua y suelo.

El suero de leche tiene un valor nutricional alto en proteínas, minerales, ácido láctico, vitamina B, ácido cítrico y grasas (Prazeres, Calvalho , & Rivas , 2012); siendo un subproducto viable para su reutilización (Mirabella, Castellani, & Sala, 2013; Gil, et al, 2009). Entre ellas se pueden nombrar las siguientes (Mirabella, Castellani, & Sala, 2013; Prazeres, Calvalho , & Rivas , 2012):

- Alimentación de ganado vacuno y porcino
- Irrigación de pastos
- Suero deshidratado
- Concentrados proteicos
- Bebidas fermentadas
- Helados de suero
- Fabricación del alcohol
- Queso Ricota.
- Fabricación de ácido láctico.

4.2.2.6 Seguridad e Higiene

La competitividad en el sector quesero demanda la modernización y la seguridad alimentaria de sus queseras.

El Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica (INTECO) es la organización nacional encargada de vigilar por la seguridad alimentaria de las queseras. Según esa entidad las pautas a seguir para asegurar una higiene adecuada son las siguientes (Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica, 2010):

- Las mesas de trabajo deben de ser de acero inoxidable.
- Pisos de cerámica con fragua póxica.
- Ventilación interna y de escape.
- Botas, guantes, gorros para la cabeza y cubre bocas.
- Utensilios de acero inoxidable.
- Colocar trampas para moscas y mosquitos.

4.2.2.7 Otras oportunidades de mejora encontradas

Para la remoción del suero de las marmitas, usualmente se realiza por drenaje, con una manguera; sin embargo esta manguera no posee ninguna prensa que permita mantenerla fija en la marmita, por lo que hay que sostenerla hasta que termine de drenar el suero. Si se implementara alguna prensa o amarre que permita mantenerla fija, la productividad de los operarios aumentaría, al poder destinar ese tiempo a otros procesos.

4.2.3 Selección de una quesera para la evaluación de las oportunidades de mejora y la evaluación de los reactores híbridos.

Se seleccionó la Finca 2 para presentar opciones de mejoras específicas en PML y la evaluación de los reactores RAFA-FAFA para el tratamiento del agua residual. Se seleccionó esta finca teniendo en cuenta que los parámetros de la calidad de agua residual se encontraba alrededor de los valores medios, que hacen separación del suero de la leche para la alimentación de porcino, es una empresa en proceso de desarrollo y certificación por denominación de origen, manifestó interés y apoyo en la evaluación e implementación de las prácticas orientadas al control de la contaminación.

La Finca 2, es una pequeña empresa de queso fresco artesanal; está ubicado en Santa Cruz de Turrialba. Actualmente trabajan 3 personas de manera fija y sus dos dueños actuales. Uno se encarga de la obtención de la leche y la distribución de los productos y el otro está a cargo de los trabajadores en la planta y la supervisión del producto. En la Figura 4-2, se describe el proceso productivo de esta pyme, donde se reflejan los puntos con salida de agua importante como en la pasteurización y el enfriamiento; las salidas del suero en el moldeo y volteo del queso, así como el requerimiento del uso de electricidad.

Tras las auditorías realizadas en esta quesera en particular y la evaluación del proceso productivo; se pueden denotar diferentes puntos donde es necesaria una intervención pronta de parte de los propietarios. Entre ellos están:

Estructurales:

- Pisos: estos son de cemento, lo que afecta la higiene del lugar, se deteriora con facilidad, arrastra sólidos a la trampa de grasas y un futuro sistema de tratamiento de aguas residuales. Lo recomendado es reforzar el piso con una mezcla de concreto resistente a los golpes y poner cerámica antideslizante para industrias con fragua epóxica.
- El ángulo de los pisos y de las tuberías no es suficiente para permitir el correcto drenaje de los líquidos. El desagüe en el plantel debe de estar en el centro con un ángulo de inclinación que asegure que los líquidos drenen hacia el centro.
- No se cuenta con un sistema de tratamiento para las aguas residuales de la planta. Se está trabajando en una propuesta anaerobia para el tratamiento de los residuos líquidos de la fabricación del queso y actividades relacionadas.

Uso del agua:

- No se utilizan mangueras con cierre automático, aumentando el gasto de agua innecesariamente, puesto que tienen que permanecer abierta durante todo su uso, aun cuando no se necesita.
- El agua que se utiliza para la fabricación de quesos proviene de una naciente y no se cuenta con estudios organolépticos ni físico químicos que caractericen el agua. En ocasiones el lote de producción sale defectuoso, especialmente en los meses de invierno; se cree que puede deberse al arrastre de sólidos en el río. Se recomienda realizar los estudios necesarios que aseguren la fuente de agua utilizada e instalar un filtro que retenga los sólidos. Dependiendo de los materiales presentes en el estudio físico químico y organoléptico se necesitará de un filtro más específico.
- Por último no se hace una reutilización del agua proveniente del proceso de enfriamiento luego de la pasteurización. Esta agua podría almacenarse en tanques para ser reutilizada en el lavado de pisos o implementos utilizados.

Tecnología:

- Para la remoción del suero de las mermitas se hace por gravedad, con una manguera; esta manguera no posee ninguna prensa que permita mantenerla fija en la mermita, por lo que hay que sostenerla hasta que termine de drenar al suero. Si se implementara alguna prensa o amarre que permita mantenerla fija, la productividad de los operarios aumentaría, al poder destinar ese tiempo a otros procesos.

Sólidos:

- No hay mallas antes de las salidas a desagües, permitiendo que los sólidos se vayan a las tuberías, trampas de grasas o futuro sistema de tratamiento. El atascamiento de sólidos en las tuberías podría producir, malos olores o retorno de las aguas residuales al plantel de producción. Utilizar una malla antes del desagüe no solo evita las problemáticas mencionadas, sino también brinda una cuantificación de la cantidad de producto que se está perdiendo, concientizando sus procesos y motivando a buscar la mejora continua.

La descarga de aguas residuales de esta planta se realiza por tandas de producción, se realizan entre (6-8) tandas de producción al día, cada descarga es de aproximadamente 4000 L, la cantidad de salmuera es aproximadamente 300 L por tanda y de suero en el influente es variable, puesto que no se le da un control estricto a la disposición del suero al ganado, por lo que en ocasiones se vierte suero con las aguas residuales. Estas características hacen que la descarga de suero y las aguas residuales sean discontinuas y de composición inestable. En el Cuadro 4-4 se presentan los valores promedios de la caracterización del agua residual proveniente de la salida de la planta productiva de queso y

el valor máximo permitido para aguas residuales vertidas en cuerpos receptores según el Reglamento de Reúso y Revertido de Aguas Residuales de Costa Rica (N° 33601-MINAE-S). Estos muestreos se realizaron entre los meses de septiembre del 2014 a abril del 2015.

Cuadro 4-4. Caracterización físico-química del influente de agua residual de la Finca 2. N=5

Parámetro	Valor	Valor aceptado en la legislación
DQO (mg/L)	2850.00 ± 187.00	500
Sólidos Suspendidos totales (mg/L)	4826.70 ± 21.72	100
Sólidos Sedimentables (mg/L)	0.40 ± 0.05	1
Sólidos Totales (mg/L)	41790.00 ± 250.74	-
Sólidos Suspendidos Volátiles (mg/L)	4753.30 ± 24.72	-
Sólidos Suspendidos Fijos (mg/L)	73.30 ± 0.37	-
Sólidos Disueltos (mg/L)	36964.00 ± 251.35	-
pH	6.60 ± 0.01	(5-9)
Temperatura (°C)	24.70 ± 0.05	(15-40)
Grasas y aceites (mg/L)	1487.00 ± 11.87	30
Turbiedad (NTU)	747.30 ± 0.5	-
Alcalinidad Total (mg CaCO ₃ /L)	134.60 ± 0.40	-
Alcalinidad por Bicarbonatos (mg CaCO ₃ /L)	19.70 ± 0.06	-
Alcalinidad por AGV (mg CaCO ₃ /L)	114.90 ± 0.34	-

A pesar que se remueve una gran parte del suero del influente de aguas residual de la quesera, la DQO (mg/L) del agua residual influente probando está por encima del valor máximo permisibles por la legislación, esto debido a la caseína presente y su composición alta en grasas y aceites.

Durante el periodo de abril del 2014 a marzo del 2015, el pH de estas aguas varió entre (3.9-6.6), probando la falta de estandarización de los procesos; estos valores son característicos de un agua fácilmente acidificable, por la descomposición de la grasa, proteínas y lactosa.

Es importante destacar que inicialmente el pH del influente era cercano a 6.5, el tratamiento anaerobio se diseñó para trabajar con este parámetro; sin embargo durante los últimos tres meses, el pH del agua descendió a valores cercanos a 4; pues se disponía el suero de leche en el influente de agua residual, afectando la eficiencia del reactor y el desempeño de las bacterias metanogénicas para la descomposición de la materia orgánica.

Lo anterior se puede ver reflejado en la composición de la alcalinidad total, donde un 85% es alcalinidad asociada a los AGV indicando que no posee efecto buffer para la

amortiguación de los ácidos, de igual manera, la alcalinidad bicarbonática del influente durante los últimos meses fue nula.

El valor de sólidos totales presentes es alto, un 88,5% de los sólidos se encuentran disueltos y el restante 11,5% son sólidos suspendidos; de manera que los sólidos presentes en el influente no serían removidos por una filtración o sedimentación inicial, sino por la acción microbiológica de las bacterias.

Todas las condiciones descritas justifican la necesidad de un sistema de tratamiento para los influentes de agua residual provenientes de la fabricación del queso tipo Turrialba.

4.3 EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DEL TRATAMIENTO HÍBRIDO RAFA-FAFA DE LAS AGUAS RESIDUALES DE UNA QUESERA ARTESANAL EN SANTA CRUZ DE TURRIALBA.

4.3.1 Estabilización del reactor sin adición de alcalinizante.

El pH influente se mantuvo en un rango de entrada entre (6.5 -7); mientras que el pH de salida se mantuvo en 4. La acidificación del reactor se presentó desde la tercera semana de aclimatación. Los índices presentados en Cuadro 4-5, para los reactores R1 y R2, demuestran que el equilibrio del reactor se perdió. Con el índice (AI/AP), se puede deducir el estado de los reactores según la relación entre la alcalinidad por AGV y la alcalinidad total; la alcalinidad total está compuesta entre un (60-70) % de alcalinidad por AGV, asegurando la acidificación total del reactor, el rango aceptable de este índice se encuentra entre (0.20-0.40), donde al menos el 60% de la alcalinidad total se deba a la acción de los bicarbonatos.

Cuadro 4-5. Índices de alcalinidad para R1 y R2 sin adición de alcalinizante.

Reactor	Índice (AI/AP)	Índice (AI/AT)	Índice Alfa
R1	1.7	0.6	0.4
R2	2.2	0.7	0.3
Valor ideal	0.3	0.3-0.4	0.5-0.7

Las primeras dos semanas no se le hicieron mediciones a los efluentes de los reactores, por la etapa de aclimatación, las mediciones se realizaron a partir de la semana 3. Los reactores

R1 y R2 no removieron la materia orgánica del influente; los efluentes presentan valores de DQO superiores a los de entrada (Cuadro 4-6), y con fluctuaciones durante el tiempo; lo que se debe a una no estabilización de los lodos anaerobios en los reactores, con lavados de lodo durante la alimentación. A la vez la acidificación del reactor generó un exceso de ácido láctico principalmente, entre otros ácidos grasos. El aumento de los ácidos por el proceso de fermentación del agua, favorece el acrecimiento de la demanda química de oxígeno y a la vez inhibe el proceso anaerobio (Stamatelatou, y otros, 2012).

Cuadro 4-6. Demanda Biológica de los efluentes R1 y R2 para el tratamiento sin adición de alcalinizante.

Semana	DQO (mg/L)	
	R1	R2
3	20 976 ± 1468	9989± 698
4	13 485± 944	8890± 621
5	40 455± 2834	47 447± 3322
6	55 486 ± 3741	52 329± 3660
7	65 380± 4577	60 534± 4238
Promedio	35074	31715
Desviación Estándar	20076	22754

Los estadísticos muestrales evidencian oscilaciones de DQO (mg/L) de 20 076 unidades según el valor de desviación estándar; el valor máximo reportado de DQO (mg/L) para los efluentes del R1 es 4.85 veces superior al valor mínimo reportado

Simultáneamente para el R2 se tiene que la desviación estándar es de 22754 unidades; el valor máximo es 6.81 veces superior al valor mínimo.

En cuanto al porcentaje de grasas y aceites, se mostró una eficiencia de remoción cercana al 58% para el R1, pasando de 1487 (mg/L) de grasas y aceites en el influente a 622 (mg/L) de en el efluente. Para el R2 se obtuvo un valor de 761 (mg/L) de grasas y aceites en efluente con una eficiencia de remoción de 49%. Sin embargo no es suficiente para los valores máximos permitidos por la legislación.

El comportamiento de los R1 y R2, es ineficiente para la remoción de la carga orgánica presente en el influente de agua residual de la quesera, la tendencia de acidificación, inhibe

la acción metanogénica, provocando un aumento en la demanda química de oxígeno y una acumulación de los AGV.

La acidificación del reactor por la acumulación de AGV's, inhabilitando la capacidad bufeer, esto dio lugar a la desintegración de las moléculas de la caseína, (ver **Figura 4-5**). Produciendo la flotación de biomasa granulada compuesta de grasa y caseína por un aumento en la viscosidad (Frigon, Breton, Bruneau, Moletta, & Guiot, 2009); esto produjo una obstrucción del filtro, imposibilitando la alimentación del reactor tal como lo reportan varios estudios (Prazeres, Calvalho , & Rivas , 2012; Vasileios , y otros, 2014; Carvalho, Prazeres, & Rivas , 2013; Vidal, Carvalho, Méndez, & Lema, 2000),

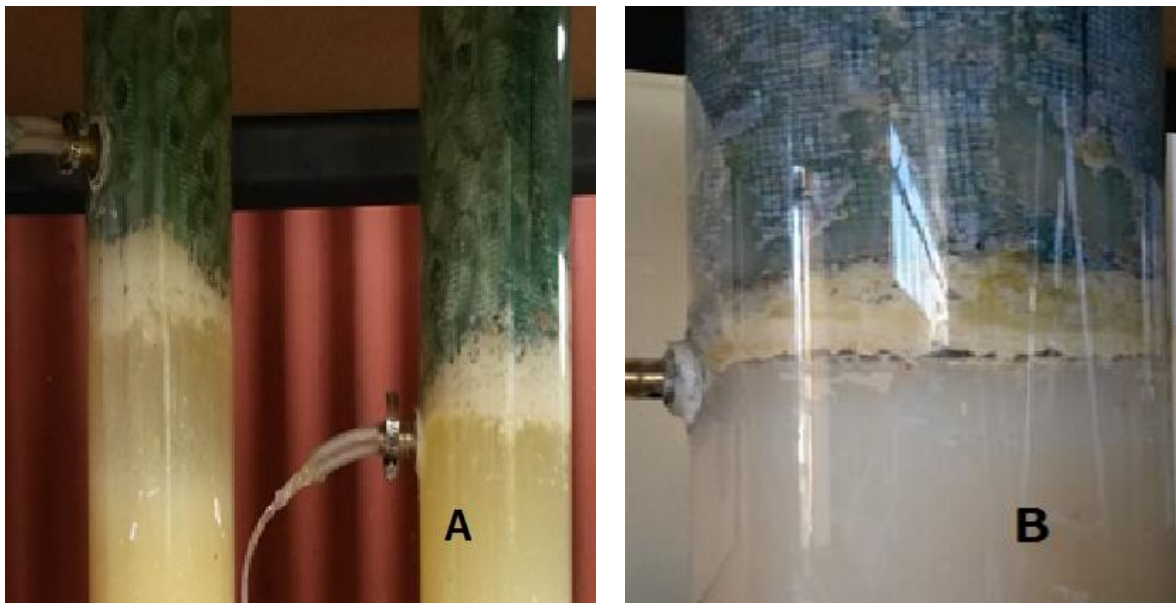


Figura 4-5. Acumulación de la caseína en la separación de las etapas RAFA-FAFA.

4.3.2 Dosis de alcalinizante para el almacenamiento del agua.

Debido a la colección y almacenamiento semanal del agua fue necesario calcular la dosis de alcalinizante ($\text{mg NaHCO}_3/\text{L}$) para la alimentación del reactor, asegurando que la alcalinidad aportada en el día 0, fuera suficiente para el día 6 de almacenamiento del agua. La alcalinidad bicarbonática debe ser de al menos $5000 \text{ (mg CaCO}_3/\text{L)}$ en la alimentación del reactor (Pérez & Torres, 2008), para operar con un índice buffer que prevenga caídas súbitas del pH por acumulación de AGV; además evitar un mal uso de alcalinizante,

llegando a saturar la solubilidad en el agua residual, acrecentando innecesariamente los costos de operación del reactor.

Los datos obtenidos en la medición de la alcalinidad bicarbonática (AP) y por AGV (AI) resultante de las muestras de agua cruda con las diferentes concentraciones de alcalinizante se presentan en el Cuadro 4-7. Las muestra sin adición de NaHCO_3 , desde el día 0 no presentaron efecto buffer, la AI, superó la AP; para el día 3 y 6 la alcalinidad total fue de 0 (ver Cuadro 4-7), puesto que el pH se mantuvo por debajo del límite de 4.7 para la medición de AGV; el uso del agua cruda es inapropiado para la alimentación de un sistema de tratamiento de agua residual.

La muestra con 2 (g NaHCO_3/L), en el día 0 la AP es 6.5 veces superior a la AI; sin embargo para los días 3 y 6, la alcalinidad total de la muestra se compuso de un 60% de AI. Para la muestra cuya concentración es de 5 (g NaHCO_3/L), la AP es superior a la AI en el día 0 y 6, el día 3 la alcalinidad por AGV fue 1.7 veces superior a la alcalinidad por bicarbonatos. Para el día 6 el aporte de alcalinidad bicarbonática es superior al requerido, siendo un 58% de la alcalinidad total, estabilizándose la alcalinidad bicarbonática, demostrando ser la concentración que impide que el agua cruda se acidifique antes de ser utilizada para la alimentación de los reactores.

Cuadro 4-7. Alcalinidad por bicarbonatos y por AGV del agua cruda con diferentes de dosis de alcalinizante durante el tiempo.

	Concentración NaHCO_3								
	0 (g/L)			2 (g/L)			5(g/L)		
Días	0	3	6	0	3	6	0	3	6
pH inicial	6	4.2	3	6	4.2	3	8	6.7	6.1
AP (mg/L)	15	0	0	1625.0	1500	500	4250	3250	1167
AI (mg/L)	187	0	0	250	2250	666.7	750	5500	833.3

AP: Alcalinidad por bicarbonatos, AI: Alcalinidad por AGV's

Según (Pérez & Torres, 2008), la relación de DQO influente-Alcalinizantes es de 1: 0.15 para aguas fácilmente acidificables; según esta relación, para una DQO promedio de 7805 (mg/L), la dosis de alcalinizante requerida es de 1.17 (g NaHCO_3/L). Tomando en cuenta las desviaciones en el valor del DQO influente, según la relación 1: 0.15, la dosis de 2 (g NaHCO_3/L) garantiza la alcalinidad demandada, siempre que la DQO influente no sobrepase

los 13000 mg/L; sin embargo, por la alta carga orgánica, la presencia de lactosa, caseína y grasas de esta agua residual (Yucheng, Fan, Liming, & Pinjig, 2013), la concentración de 2 (g/L) de NaHCO_3 no es suficiente, ya que para el día 6 la alcalinidad por AGV fue superior a la alcalinidad por bicarbonatos.

La caída súbita de pH refleja la ausencia de alcalinidad y acidez característica del agua residual proveniente de la quesera artesanal. La descomposición natural del influente, induce a una rápida producción de AGV y al decrecimiento del pH por ende. Esto se vio reflejado en que para el día 0 se reportó un valor de pH de 6, pero la capacidad bicarbonática del agua fue cercana a 0.

Para la muestra con concentración de 2 g/L, el pH se mantuvo dentro de un rango aceptable, pasó de 8 unidades para el día 0 a 6.1 en el día 3; la alcalinidad total tuvo su punto más alto en el día 3 con 3750 mg CaCO_3 /L, debido al aumento de la AI; para el día 6 la alcalinidad total mermó a 1166.6 mg CaCO_3 /L, estando compuesto de AI en un 57%.

La muestra con una concentración de 5 g/L, presentó una tendencia similar a la muestra con 2 g/L, su punto más alto de alcalinidad fue al día 3, predominando los AGV; entre el día 3 y 6 la alcalinidad bajó bruscamente de (5000 a 2000) mg CaCO_3 , mientras que el pH se mantuvo en un rango de (8.3-7.6).

Se decidió utilizar 5 (g/L) de NaHCO_3 para el almacenamiento del agua residual, dando un valor de alcalinidad bicarbonática de 1167 (mg/L) CaCO_3 ; esta concentración evita el desfase de AI sobre AP en el influente para su posterior uso en la alimentación del reactor.

4.3.3 Actividad metanogénica (AME) con adición de alcalinizante.

Con el fin de no sobrellevar una acidificación temprana del reactor y asegurar un costo de dosificación conveniente para la operación de los reactores, se realizó este experimento, buscando la dosis de alcalinizante que asegure un mejor desempeño de la actividad metanogénica en el reactor.

La adición de nutrientes se hizo a recomendación de (Vidal, Carvalho, Méndez, & Lema, 2000) y por la baja relación C/N y C/F de estas aguas residuales (Prazere, Carvalho, & Rivas, 2012).

La producción de actividad metanogénica se obtiene del valor de la pendiente obtenida en la ecuación lineal del gráfico de metano producido durante el experimento (ver Figura 4-6), el valor de R^2 se puede ver que los datos tienen correlación entre sí.

El agua cruda inhibió el sistema, la producción de actividad metanogénica fue nula. Para los otros cuatro reactores, la producción de metano fue en aumento hasta llegar al día 25, donde se estabilizaron los volúmenes de metano producidos.

Los reactores con 2 (g/L) de NaHCO_3 con y sin nutrientes, presentaron diferencias considerables entre sí. El reactor que se le adicionó nutrientes, se desempeñó mejor, la actividad metanogénica generada (ver Cuadro 4-8) fue de 0.010 ($\text{kg CH}_4/\text{kg SV}^*\text{d}$), la actividad metanogénica para el reactor sin adición de nutrientes fue de 0.003 ($\text{kg CH}_4/\text{kg SV}^*\text{d}$).

Cuadro 4-8. Actividad metanogénica de agua cruda con diferentes de dosis de alcalinizante y nutrientes. N=1.

Actividad Metanogénica Producida	
Muestra	kg CH_4/ kg SV^*d
Cruda	0.000
(2 g/L) NaHCO_3	0.003
(2 g/L) NaHCO_3 - Nutrientes	0.010
(5 g/L) NaHCO_3	0.006
(5 g/L) NaHCO_3 - Nutrientes	0.004

Para los experimentos con una dosis de alcalinizante de 5 (g/L) de NaHCO_3 con y sin nutrientes, el efecto fue contrario, la actividad metanogénica para el reactor con adición de nutrientes fue de 0.004 ($\text{kg CH}_4/\text{kg SV}^*\text{d}$), mientras que el reactor sin adición de alcalinizante presentó una actividad metanogénica de 0.006 ($\text{kg CH}_4/\text{kg SV}^*\text{d}$).

El experimento con mejores resultados fue el que utilizó una dosis de alcalinizante de 2 (g/L) de NaHCO_3 y adición de nutrientes; seguido del reactor con 5 (g/L) de NaHCO_3 sin adición de nutrientes; en comparación con los reactores restantes, el crecimiento bacteriano se da de manera lineal y constante.

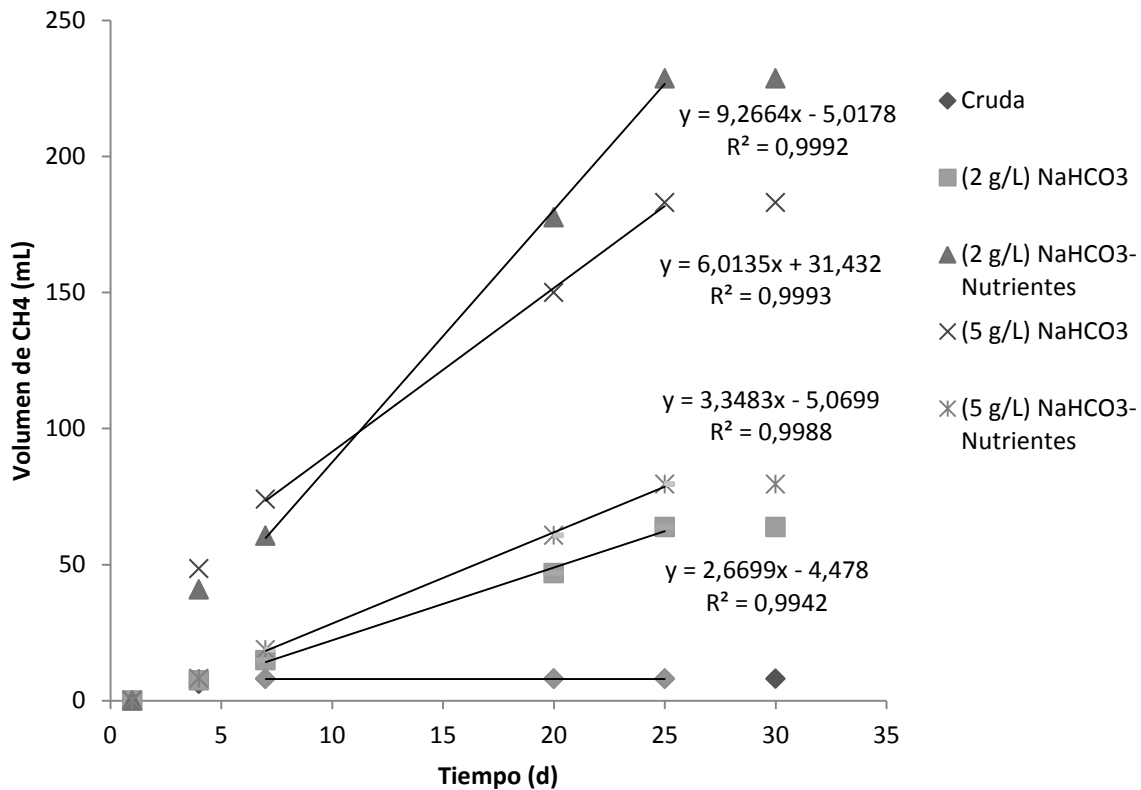


Figura 4-6. Volumen de CH₄ acumulado en los reactores a 21 °Cy 1360 msnm.

Se puede observar que en los primeros diez días la producción de metano no presenta diferencias significativas con las combinaciones de alcalinidad y nutrientes, con excepción del agua cruda; las diferencias entre los reactores se denotan con los días. Este comportamiento permite coincidir con lo reportado por (Yucheng, Fan, Liming , & Pinjig, 2013), que cuando se tiene una concentración de alcalinidad mayor a la requerida por el sustrato e inóculo se presenta un efecto inhibitorio en la producción de la actividad metanogénica.

Con los resultados obtenidos en la prueba de actividad metanogénica se dispuso a utilizar la concentración de 2 (g/L) de NaHCO₃, que presentó una buena producción de actividad metanogénica y disminuye los costos relacionados a la adición de sustancias químicas.

4.3.4 Estabilización del reactor con adición de alcalinidad y nutrientes

4.3.4.1 Comportamiento de la Alcalinidad

Con los resultados obtenidos en las pruebas de dosis de alcalinizante para el almacenamiento y la actividad metanogénica, se mostró que con 2 (g/L) de NaHCO_3 , el reactor opera adecuadamente; por ello se decidió utilizar esta dosis durante la alimentación de los reactores y 30 (g/L) de NaHCO_3 para la preparación del inóculo y sustrato en el arranque.

La alimentación del reactor se divide en dos tiempos del 7 de abril al 6 de mayo del 2015 y del 6 de mayo al 19 de mayo del 2015, donde las características del influente variaron considerablemente.

Durante la primera etapa de alimentación, la dosificación de alcalinizante impidió la temprana acidificación del reactor, permitiendo mantener valores de alcalinidad bicarbonática superiores a los AGV's.

La alcalinidad reportada para los efluentes del reactor 1 se muestran en la Figura 4-7; los valores de alcalinidad total se mantuvieron en el rango (3000-5250) mg CaCO_3/L ; los valores de AP y AI para R1 estuvieron entre los (1250-3750) mg CaCO_3/L y (1000-1750) mg CaCO_3/L respectivamente.

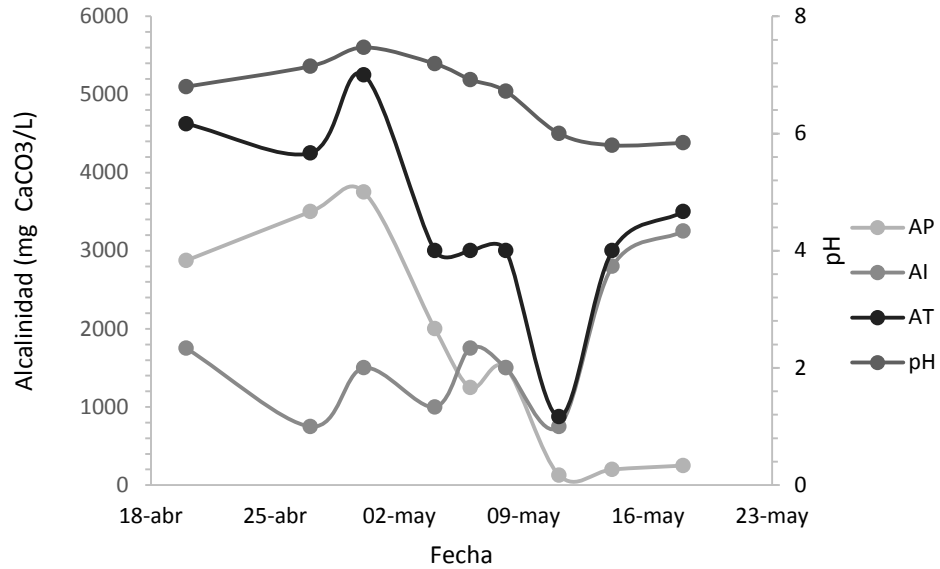


Figura 4-7. Alcalinidad de los efluentes de R1.

Para los efluentes del reactor 2 la alcalinidad total se mantuvo entre (3100-5375) mg CaCO₃/L (Figura 4-8); la AP estuvo entre (1250-3250) mg CaCO₃/L y la AI entre (400-2250). En ambos reactores predominó la alcalinidad por bicarbonatos, la acidez se mantuvo regulada, de modo que la tasa de producción de bacterias metanogénicas era superior a la tasa de producción de bacterias acidogénicas, logrando un equilibrio y la capacidad buffer suficiente para el funcionamiento de ambos reactores.

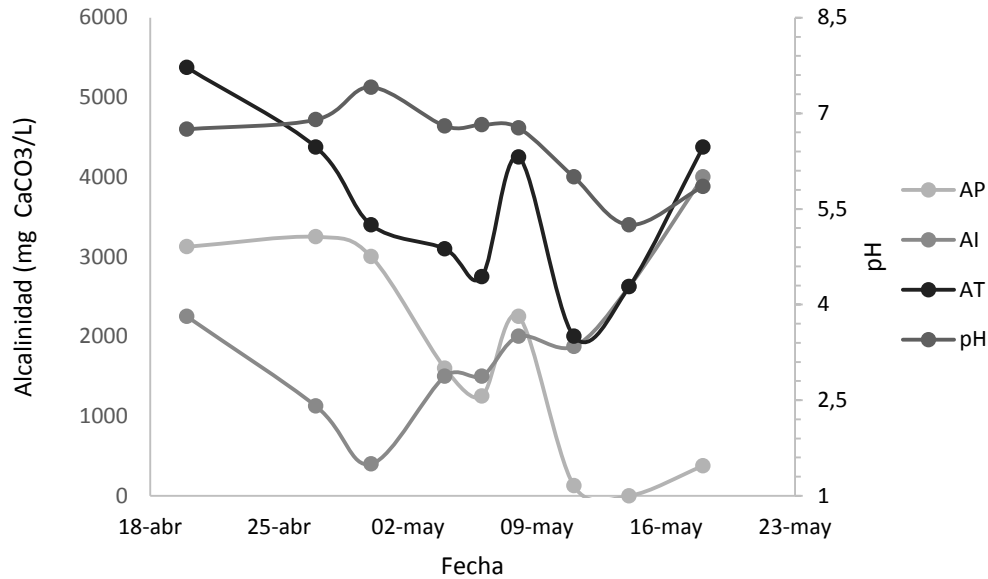


Figura 4-8. Alcalinidad para los efluentes de R2

Una relación de (1.4 AP: 1 AI) aseguran condiciones buffer adecuadas para mantenimiento del proceso de digestión anaerobia (Yucheng, Fan, Liming , & Pinjig, 2013); esta relación (AP: AI) fue buena para ambos reactor, osciló entre (2:1-4.6:1) para R1 y (3:1 -7.5:1) para el R2, la diferencia entre los radios de alcalinidad para los reactores está relacionada a la composición de los reactores, el 60% del volumen total del R1 es lodo, de manera que la alcalinidad aportada es consumida mayormente para la neutralización del inóculo, repercutiendo en valores inferiores de alcalinidad bicarbonática en el efluente, en comparación al R2.

Para la segunda etapa de alimentación, el R2 presentó valores de alcalinidad asociados a los AGV's más altos y con menor capacidad de amortiguamiento que el R1. Esto se puede observar con el desfase en los radios de AP: AI, donde predominó la alcalinidad asociada a los AGV's en ambos reactores; para el R1 el radio estuvo entre (1:1-1:13) y para el R2 entre (1:1.2-1:2625); aunque en ambos reactores la fase acetogénica desplazó la fase metanogénica, aumentando los valores de AGV's; el cambio menos brusco fue para el R1, revelando que la combinación donde se favorece el tratamiento RAFA, tienen mejor capacidad de amortiguamiento de la acidez que la combinación que favorece FAFA.

El comportamiento del pH con la alcalinidad bicarbonática para los reactores 1 y 2 (Figura 4-9) indica que no se puede relacionar directamente con la alcalinidad asociada al agua (Pérez & Torres, 2008). Ambos reactores presentaron tendencias similar, cuando la AP disminuyó bruscamente el pH se mantenía entre los 7.5, no fue sino hasta el 11 de mayo cuando se presencia que toda la capacidad bicarbonática en los reactores fue consumida y se propagó el aumento de los AGV's, esto debido a que los cambio de pH se presencian cuando la concentración de alcalinidad bicarbonática ha cambiado en un promedio 1.7 veces de su valor anterior (Yucheng, Fan, Liming , & Pinjig, 2013); siendo el pH un parámetro insuficiente para el control; por ello es necesario evaluar la capacidad bicarbonática del sistema con índices de alcalinidad.

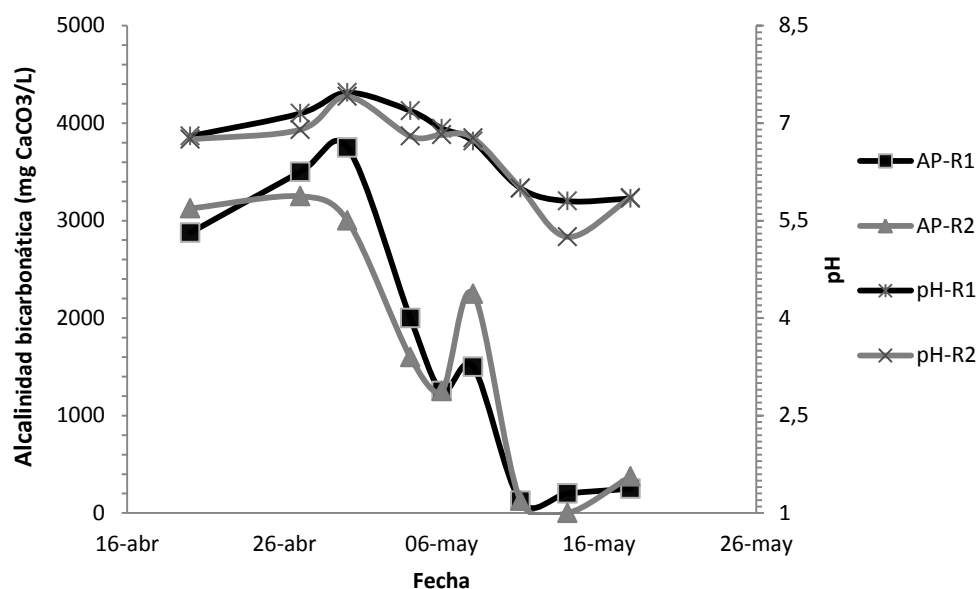


Figura 4-9. Relación Alcalinidad Bicarbonática (mg CaCO₃/L) vs pH para el R1 y R2.

AP: Alcalinidad bicarbonática

Durante los primeros días de alimentación la AP en los efluentes de ambos reactores fue mayor al influente, debido a la adición de alcalinizante para el acondicionamiento del inóculo, en los días posteriores el valor descendió por la estabilización del inóculo y el consumo de alcalinidad requerido por el sustrato fue aumentando. Entre el (6-11) de mayo se observa un aumento en la AP, producto del aumento en la dosis de alcalinizante, pero no se logró evitar la acidificación de los reactores.

Se recomiendan valores del índice buffer entre (0.2-0.35); si este índice se encuentra por debajo de 0.20, el sistema se encuentra subalimentado, por encima de 0.35 es indicador que el sistema está inestable y se ha acidificado (Pérez A., 2007).

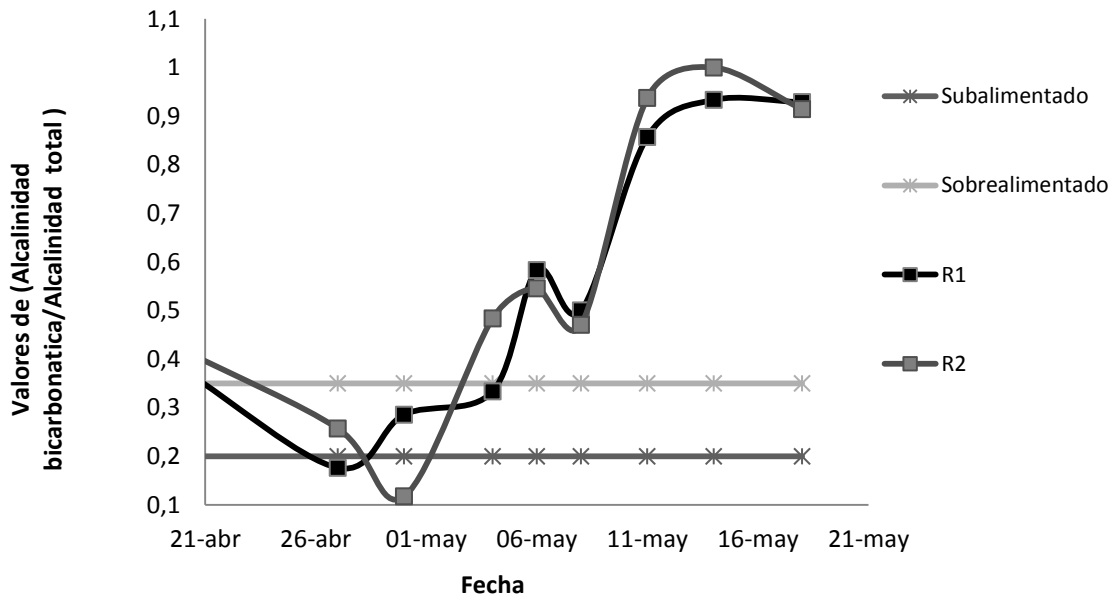


Figura 4-10. Comportamiento del Índice Alfa en el tiempo para los efluentes R1 y R1 durante la alimentación con adición de alcalinizante.

Las características del influente cambian en cada vertido por lote producido, debido a la falta de estandarización explicada, diariamente la cantidad de suero mezclado las aguas residuales varía, por circunstancias diversas, tales como despegue en la conexión de las tuberías que llevan el suero a los cerdos, atascamiento de las tuberías, demanda de producto, fabricación de subproductos, descuido, entre otros. Esto dificulta el tratamiento de las aguas residuales, puesto que la concentración de suero, altera las características del agua residual al ser la componente principal de los altos valores de DQO y baja capacidad bicarbonática asociados a la producción de queso.

4.3.4.2 Comportamiento de la Demanda Química de Oxígeno.

Los reactores híbridos fueron diseñados para trabajar con una DQO influente cercana a los 3000 (mg/L), aceptando variaciones entre los (2500-5000) mg/L, según parámetros de DQO y TRH que han usado los autores (ver Cuadro 2-4); a los valores de DQO influente oscilaron entre los (4010-5877) mg/L (ver Cuadro 7-3, apéndice 3Cuadro 7-3) durante la primera etapa de alimentación.

A pesar de la susceptibilidad a la que se ven expuestos los pilotos por las escalas que se manejan, el índice buffer indicó que el sistema toleró bien la carga orgánica, mostrando inclusive valores que reflejaban subalimentación del sistema, no obstante, la estabilización de los reactores sí se ve alterada.

Los valores de DQO para los efluentes R1 y R2 reportados (ver Cuadro 7-3), están desfasados en relación al influente, de modo que la lectura de DQO de los efluentes reportada para el 20 de abril, se debe relacionar con la DQO influente del 17 de abril y así sucesivamente.

Los valores de mínimos y máximos reflejan el cambio brusco en la composición del influente y las repercusiones que tiene a la vez en los reactores. Este cambio es producto de una mala separación del suero de leche de las aguas residuales. Es por esto que se divide la alimentación de los reactores en primera etapa y segunda etapa.

Durante la primera etapa de alimentación el R1 presentó mejor tendencia de estabilidad que el R2 (Figura 4-11), reduciendo en cada descarga la DQO efluente; el R2 fue inestable durante su aclimatación, esto se debe a que en un reactor híbrido la función principal de la etapa FAFA es la retención de biomasa aumentando su tiempo de retención y la parte RAFA es la que contiene el lodo granular y flocular encargado de la descontaminación del agua residual (Najafpour, Hashemiyeh, Asadi, & Ghasemi, 2008).

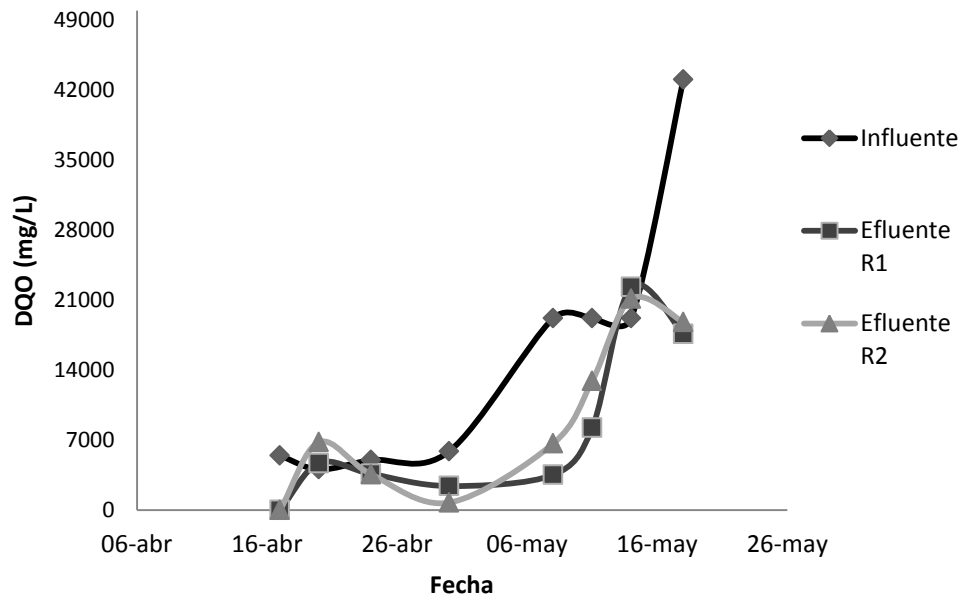


Figura 4-11. Comportamiento de la DQO de los efluentes R1 y R2 con adición de alcalinidad.

Para la segunda etapa de alimentación se denota que el R1, se mantuvo más estable ante el cambio brusco de DQO en comparación al R2, sin embargo, el colapso de ambos reactores fue inevitable. Esto indujo a que los valores final de DQO efluente fueran superiores a los de influente, ya que al fermentarse la lactosa, genera un exceso de ácidos lácticos (Figura 2-1) y otros ácidos orgánicos (Stamatelatou, y otros, 2012).

4.3.4.3 Relación entre el Índice Buffer y la remoción de DQO.

El índice buffer fue el parámetro principal de monitoreo de control de estabilidad de los reactores; en la Figura 4-12 se presenta la relación entre este y la eficiencia de remoción de la DQO. Para el R1 estos valores fueron coherentes entre sí; cuando el índice buffer se mantuvo dentro del rango aceptable (0.2-0.4), se obtuvieron los mayores porcentajes de remoción y cuando el valor del índice Buffer fue cercano a 1, la eficiencia de remoción fue cercana a 0. Se observó que para los valores de índices buffer de 0.55 y 0.90 se reportaron eficiencias de remoción de (50 y 65) % respectivamente; pues aunque el parámetro de IB indicaba inestabilidad en el sistema, no se había perdido toda la capacidad bicarbonática; empero cuando la concentración de AGV's desplazó toda la alcalinidad bicarbonática, acidificando totalmente el sistema de tratamiento, la eficiencia baja a 0.

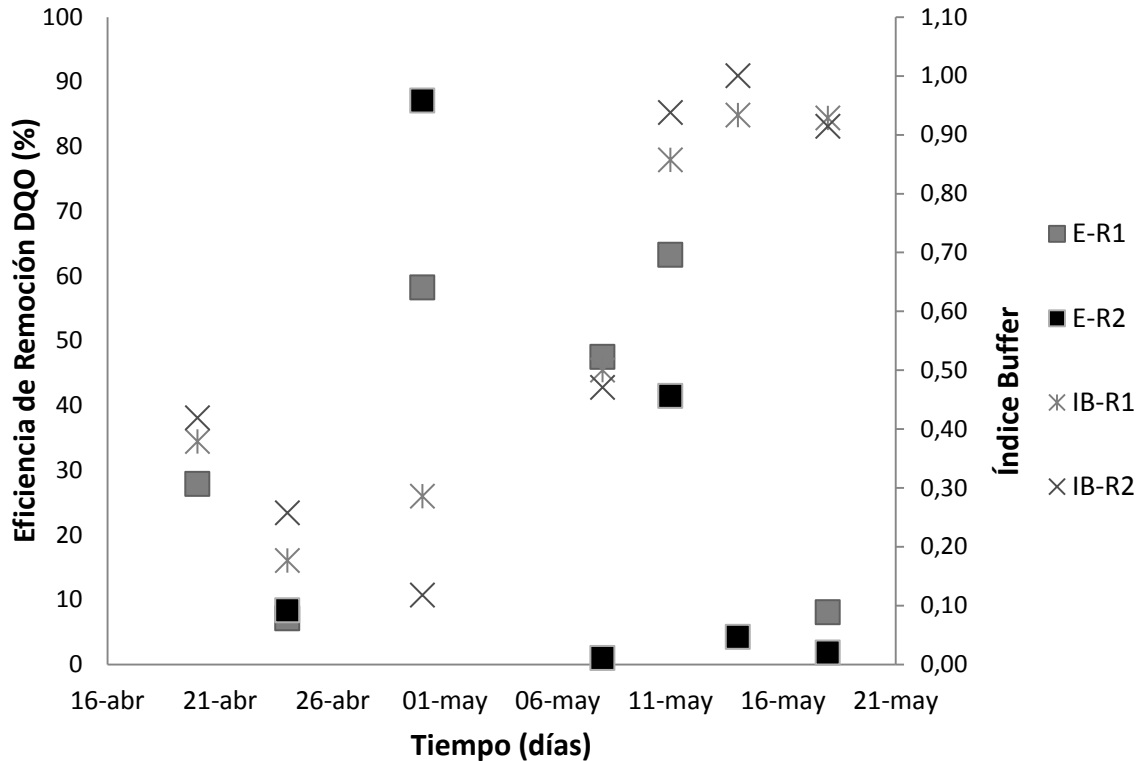


Figura 4-12. Comportamiento de la eficiencia de remoción y el índice buffer en el tiempo.

E-R1: eficiencia del reactor-1, **E-R2:** eficiencia del reactor-2, **IB-R1:** Índice buffer del reactor-1, **I-R2:** Índice buffer del reactor-2.

La eficiencia promedio reportada para el R1 fue de 40%, con una desviación estándar de 25% entre los datos, para el R2, el valor promedio de de remoción de la DQO fue de 35, con una desviación estándar de 39%. El estadístico muestral de remoción de la DQO, para el R2 demuestra que no se pueden relacionar directamente, los reactores, por la inestabilidad presentada durante todo el proceso para el R2, explicada anteriormente.

El cambio repentino y brusco en las características del agua residual de la quesera, no se tenía contemplado para la evaluación de los reactores, haciendo insostenible para el sistema aclimatarse a las nuevas condiciones de manera repentina sin la aclimatación adecuada; el tratamiento se diseñó para trabajar con DQO cercanas a los (3-5) g/L.

Según Stamatelatou, 2012, no se debe introducir directamente (sin aclimatación, ni ajuste de alcalinidad) cargas orgánicas volumétricas mayores a $(7 - 8) \text{ kg DQO} / \text{m}^3 * \text{d}$, con alto

contenido de grasas y aceites por el suero de leche, pues se puede dañar completamente el

sistema de tratamiento. Según las dimensiones y diseño de los reactores, para valores de DQO cercanos a los 16 g/L, se obtiene una carga orgánica volumétrica de $7 \text{ kg DQO} / \text{m}^3 * \text{d}$, esto explica el colapso total de ambos reactores

Autores han reportado que los sistemas anaerobios para que seras son capaces de trabajar con buenas eficiencias de remoción de DQO para cargas orgánicas altas, para DQO entre (5.0-77.0) g DQO/mL, con tiempos de retención entre (2.3- 11.6) días, se han reportado eficiencias de (95-99) %, requiriéndose más de 5 días de tiempo de retención para valores mayores a 20 g DQO/L (Malaspina & et al, 1995), entre otros muchos ejemplos. Estos tratamientos son aclimatados de manera paulatina y con una alimentación controlada de la carga orgánica sostenido, permitiéndole a las bacterias estabilizarse y que no se den acumulaciones excesivas de los AGV's que puedan dañar y poner en parada el sistema.

4.3.4.4 Concentración de sólidos.

El 18 de mayo, al término de la última alimentación del reactor, se tomó una muestra de los efluentes R1 y R2, para analizar los sólidos presentes. El Cuadro 4-9 se observa que todos los parámetros de sólidos analizados en el agua cruda se vieron disminuidos en los efluentes de ambos reactores, los sólidos totales se redujeron en un (40 y 38) % del valor inicial para R1 y R2 respectivamente, la cantidad de sólidos suspendidos totales, se redujo un (66 y 68) % R1 y R2; tomando en cuenta que el sistema ya había descendido su eficiencia de remoción, el descenso en los valores de sólidos a la salida de los reactores, son un indicio del potencial de remoción de la materia orgánica que puede obtenerse de los sistemas anaerobios utilizando estiércol de cerdo como inóculo.

Cuadro 4-9. Composición de sólidos en los efluentes R1 y R2.

Reactor	ST (mg/L)	SST(mg/L)	SSV(mg/L)	SSF(mg/L)
R1	25120	1806	1780	27
R2	25867	1533	1513	20
Agua Cruda	41790	4826	4753	73

Sin embargo los valores siguen siendo elevados en comparación a los límites máximos de legislación, por ejemplo, el Reglamento de Reúso y (Ministerio de Ambiente y Energía,

2007) acepta un valor máximo de 100 (mg/L) de SST para ser vertidos en un cuerpo receptor de agua, en los efluentes R1 y R2 se obtuvieron valores de (1780 y 1513) mg/L de SST.

La relación SST/ST para R1 es de un 7% y de 6% para el R2, indicando que los sólidos presentes en el efluente son disueltos y un tratamiento de filtración o sedimentación posterior no removerían la materia orgánica disuelta, sino que se requiere de una oxidación biológica por bacterias.

Se ha probado ampliamente (ver Cuadro 2-4) que los sistemas de tratamiento anaerobio pueden remover eficientemente la materia orgánica de las aguas residuales de queseras, con una adecuada aclimatación, tiempos de retención de acuerdo a la carga orgánica y la adición de alcalinidad bicarbonática; para los influentes que no hay separación del suero de leche, la aclimatación se realiza por etapas, aumentando la carga hasta llegar al valor de operación y diseño.

El sistema que más ha sido probado es el RAFA; es por ello que se cree (Calli & Ali , 2002) que un tratamiento híbrido anaerobio es factible técnicamente ya que aumenta el tiempo de retención de los sólidos y de la biomasa.; otros autores recomiendan utilizar sistemas en serie o una combinación de dos tratamientos cuando las cargas orgánicas volumétricas sean superiores a 8 (g DQO/L*d); sin embargo cuando los influentes son superiores 38.1 g DQO/L producen inestabilidad en los sistemas de tratamiento, debido a que las bacterias metanogénicas no asimilan las altas concentraciones de AGV's (Kalyzhnyi, 1997; Stamatelatou, y otros, 2012). Tomando en cuenta los valores de DQO característicos del suero de leche pueden oscilar entre (12-75) g/L, se hace indispensable la dilución de los influentes, para obtener eficiencias de remoción altas, disminución en los costos de operación y mantenimiento y mayor control de la estabilidad del reactor.

Para este estudio se prueba que dentro de las condiciones de diseño establecidas inicialmente, es factible técnicamente utilizar un tratamiento híbrido anaerobio en una quesera artesanal de queso Turrialba; siempre y cuando el suero de leche sea separa del influente de agua residual, alcanzando eficiencias de remoción de DQO entre el (65-90)%.

5 CONCLUSIONES.

Este trabajo presenta resultados importantes para los queseros de la zona de Santa Cruz de Turrialba, al brindar soluciones a la problemática ambiental relacionada a la producción del queso, estas pueden ser aplicables independientemente de la escala de producción, o nivel de optimización, en las queseras artesanales de Costa Rica.

Las cinco queseras de Santa Cruz de Turrialba presentaron diferencias significativas notables en sus costumbres, producción del queso, manejo de los residuos líquidos, entre otros. Por lo cual, no se puede estandarizar o generalizar entre estas plantas. Sin embargo, se pueden clasificar las queseras de la zona en aquellas que pasteurizan con procesos más definidos, generación de mayor volumen de agua y dilución de la DQO, y las que no pasteurizan, donde no hay control del proceso, más pérdidas de producto y limitaciones económicas para la implementación de oportunidades de mejora y sistemas de tratamiento.

Las queseras tienen grandes cambios por realizar; uno de los retos más importantes es realizar un control estricto en separación del suero del agua residual para la implementación de tratamientos para las aguas residuales, pues actualmente la mayoría disponen sus aguas a los pastizales y otros tienen sistemas de tratamiento realizados por ellos mismos, sin criterios de diseños que garanticen su eficiencia de remoción de la carga orgánica elevada que presentan estas aguas.

La implementación de P+L en industrias queseras se puede aplicar en el uso del agua, control de registros, usos de la energía, los residuos sólidos generados, valorización de los subproductos, mejora de la seguridad y la higiene, entre otras.

Para las queseras que pasteurizan, los procesos con más potencial económico y ambiental de implementar herramientas de P+L son en la realización del cuajo, procesos térmicos y reutilización del agua usada para la pasteurización. Las fincas que producen queso crudo, tienen mayores potenciales económicos y ambientales al llenar los moldes, realizar el cuajo y en la estandarización de los procesos.

Las queseras artesanales tienen procesos productivos diferentes aunque realizan un queso similar, la cantidad de desechos dispuesto varía constatemente, esta característica

imposibilita la aclimatación, control y operación en la implementación de sistemas de tratamiento anaerobios eficientes y estables

Las aguas residuales generadas durante la producción de queso presentan altas cargas orgánicas, poca capacidad bicarbonática, altas concentraciones de lactosa y grasas diluidas que le dan una tendencia de pronta acidificación y acumulación de AGV's.

El suero de leche mezclado en el agua residual dificulta el tratamiento anaerobio al alterar las características de DQO y capacidad bicarbonática., generando inestabilidad el sistema, disminuye la eficiencia, incrementa los costos operativos y de mantenimiento y requeriría invertir en un sistema de tratamiento secundario complejo.

Existe potencial de tratamiento por medio de sistemas anaerobios teniendo en cuenta que tanto el proceso como las aguas residuales deben estar en condiciones controladas, tal como carga orgánicas, capacidad bufer y nutrientes.

El agua residual influente de la producción de queso responde adecuadamente con la adicción de una dosis de 2 (g NaHCO₃/L) y la adición de nutrientes, asegurando un buen desempeño de la fase metanogénica. Para el tratamiento anaerobio de las aguas residuales de las queseras, es necesario agregar un alcalinizante que asegure la capacidad buffer.

Los reactores híbridos anaerobios alcanzan eficiencias de remoción de 65 % para el R1 y de 41% para el R2, con TRH de 2.3 días, DQO influente de 5 (g/L) y un IB entre (0.2-0.4).

Para valores del IB cercanos a 1, la eficiencia de remoción de los RHA es menor al 5%.

El reactor que favorece la fase RAFA, tiene un mejor IB y presenta más capacidad de amortiguación de la acidez producto de los AGV's, que la configuración que favorece la fase FAFA.

Los reactores híbridos toleran variaciones en la DQO influente del doble del valor del diseño, si se mantienen un control del IB.

Los RHA remueven un 70% los sólidos del agua cruda. La relación SST/ST de los sólidos en el efluente de los RHA refleja la necesidad de un tratamiento secundario de oxidación biológica.

No se puede comparar el desempeño del R1 y el R2, debido al corto periodo de alimentación y la inestabilidad de los RHA; no obstante, el R1, fue más estable y con un aumento sostenido en remoción de carga orgánica de los efluentes.

Con cambios repentinos de la carga orgánica, sin una aclimatación, ni acondicionamiento; se inhibe la actividad metanogénica en el tratamiento híbrido.

Bajo las condiciones mencionadas se concluye que este tratamiento puede llegar a ser factible técnicamente para el tratamiento de las aguas residuales de queseras artesanales.

6 RECOMENDACIONES

Basado en los resultados obtenidos en este proyecto, se realizan las siguientes recomendaciones para futuras investigaciones en la materia:

Implementar las medidas de producción más limpia en las queseras, concientizar en la importancia de hacer una buena gestión del agua y estandarización de los procesos. Esto facilitará la implementación de sistemas de tratamiento a escala real.

Es indispensable la construcción de un tanque de homogenización del caudal previo a la alimentación del sistema, ya que las características físico-químicas, la cantidad de agua generada y los litros de leche procesados varían entre los lotes de producción.

Es necesaria la separación del suero de las aguas residuales generadas.

El suero de leche tiene potencial para la generación de subproductos, como quesos, jabones, frescos entre otros; el aprovechamiento del suero de leche, significaría un incremento económico para la quesera y se evita el verter el suero crudo.

En la medida de lo posible, utilizar agua residual fresca, o acortar el tiempo de almacenamiento.

Evaluar utilizar los tratamiento en serie y no en paralelo, pasando primero por el reactor 50% RAFA-50% FAFA y luego por el reactor 40% RAFA-60% FAFA, actuando este último en la retención de los sólidos; esto aumenta la eficiencia total del sistema.

No utilizar la medición de pH como un parámetro de control para el desempeño de los reactores anaerobios, ya que los cambios en el pH se presencian cuando la alcalinidad bicarbonática ha cambiado su valor en promedio 1.7 veces del anterior.

No introducir directamente y sin aclimatación cargas orgánicas volumétricas cercanas a los $7 \text{ kg DQO} / \text{m}^3 * \text{d}$, pues daña el sistema de tratamiento.

Estudiar composición de macro y micronutrientes del sustrato, las relaciones C/N y C/F; que garanticen el crecimiento biológico y aumenta la eficiencia del sistema. De igual manera, estudiar el desempeño de la capacidad bicarbonática utilizando otros alcalinizantes como NaOH, Ca(OH)₂, NH₄HCO₃.

Analizar la factibilidad técnica de los reactores híbridos utilizando una escala más grande, que facilite la calibración de un caudal a flujo constante y que disminuya la susceptibilidad asociada a las variaciones en la carga orgánica.

Además se requiere de un tratamiento secundario, para pulir el efluente y disminuir la concentración de sólidos, de modo que cumpla con los límites establecidos por la legislación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alvarado, A. (2011). *Evaluación de materiales de desecho como medio filtrante en filtros anaerobios de flujo ascendente*. Cartago.
- Arias, A. (23 de Septiembre de 2013). Diagnóstico e Indicadores de proceso para el diseño de P+L Parte 1: Introducción. Caminos hacia la Producción más Limpia.
- Arias, A. L. (7 de mayo de 2015). MSc. Ing. (R. S. Martínez, Entrevistador)
- Arroja, L., Feijoo, G., González, S., Hospido, A., & Moreira, M. (2013). Environmental Life Cycle Assessment of a Galician cheese: San Simon da Costa. *Journal of Cleaner Production*, 253-262.
- Asif Latif, M., Ghufuran, R., Abdul Wahid, Z., & Ahmad, A. (2011). Integrated application of upflow anaerobic sludge blanket. *Water Researcher*(45), 4683-4699.
- Basappaji , K., & Nagesha, N. (2013). Assessment of cleaner production level in agro based industries a fuzzy logic approach. *4th International Conference on Advances in Energy Research 2013, ICAER 2013* (págs. 127-134). Bombay: ELSEVIER.
- Bedoya, O. A. (16 de octubre de 2009). Treatment of Dairy Industry Wastewater Using UASB Anerobic System. Colombia.
- Belancon, D., Fuzzato, M., Gomes, D., Cichello , G., & Pinho, S. (2010). A comparison of two bench-scale anaerobic systems used for the treatment of dairy effluents. *International Dairy*, 63, 290-296.
- Bermúdez, R., Rodríguez, S., Martínez, M., & Terry, A. (2003). Ventajas del empleo de reactores UASB en el tratamiento de residuales líquidos para obtención de biogás. *Tecnología Química*, 23(2), 37-44.
- Blanco, M. (2007). *Caso Estudio DO Queso Turrialba*. Cartago.
- Blanco, M. (2008). La Ruta Agroturística del Queso Turrialba en Costa Rica. *Escuela Centroamericana de Ganadería (ECAG)*, 42-43.
- Caicedo, F. (2006). *Diseño, construcción y arranque de un reactor UASB piloto para el tratamiento de lixiviados*. Universidad Nacional de COlombia, Manizales.
- Calli, B., & Ali , M. (2002). Anaerobic Treatment by a Hybrid Reactor. *Environmental Engineering Science*, 19(3), 143-150.

- Carvalho, F., Prazeres, A., & Rivas, J. (29 de Enero de 2013). Cheese whey wastewater: Characterization and treatment. *Science of the total Environment*, 445-446, 385-396.
- Carvalho, F., Prazeres, A., & Rivas, J. (2013). Cheese whey wastewater: Characterization and treatment. *Science of the Total Environment*, 445-446, 385-396.
- Consejo Nacional de Producción. (Julio de 2001). Mejoramiento de la Sanidad y calidad del queso fresco elaborado en las queserías artesanales y rurales de Costa Rica. *Programa de Lácteos*. San José.
- Djekic, I., Miocinovic, J., Tomasevic, I., Smigic, N., & Tomic, N. (Diciembre de 2013). Environmental life-cycle assessment of various daisy products. *Journal of Cleaner Production*(68), 64-72.
- Eaton, A., Clesceri, L., & Greenberg, A. (1995). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (19 ed.). Maryland: United Book Press.
- Environmental Protection Agency. (Abril de 2000). Obtenido de www.epa.gov
- Ergüder, T., Tezel, U., Güven, E., & Demirer, G. (2001). Anaerobic Biotransformation and methane generation potential of Cheese Whey in batch and UASB reactors. *Waste Manage*, 21(7), 643-650.
- Estrada, M., Gutierrez, M., Oliviano, M., & Rangel Rodríguez, A. (16 de Abril de 1993). Diseño de un Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales para la Industria Quesera. Iztapalapa, México.
- Frigon, J., Breton, J., Bruneau, T., Moletta, R., & Guiot, S. (2 de Mayo de 2009). The treatment of cheese whey wastewater by sequential anaerobic and aerobic steps in a single digester at pilot scale. *Bioresouruce Technology*, 100, 4156-4163.
- Gannoun, H., Bouallagui, H., Touhami, Y., & Hamdi, M. (2004). Biomethanation of cheese whey using an upflow filter. *European Symposium on Environmental Biotechnology*. Londres: Taylor & Francis Group.
- Gannoun, H., Khelifi, E., Bouallagui, H., Touhami, Y., & Hamdi, M. (Septiembre de 2008). Ecological clarification of cheese whey prior to anaerobic digestion in upflow anaerobic filter. *Bioresource Technology*, 99(14), 6105-6111.
- García De Las Heras, J., Lopetegui Garnika, J., Soroa del Campo, S., & Almandoz Pereira, A. (Diciembre de 2005). Diseño de reactores híbridos anaerobios para el tratamiento de aguas residuales industriales. *Tecnología del Agua*, 60-67.

- Garzón, J., & López, J. (Marzo de 2008). Análisis de una alternativa de producción más limpia que permita aprovechar los residuos que generan los procesos de pasteurización y enfriamiento de la leche en la empresa Friesland Lácteos Purace de San Juan de Pasto. *Proyecto de Investigación para optar por el título de Especialista en Gestión Ambiental Local*. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.
- Gavala, H., Kopsinis, H., Skiadas, I., Stamatelatos, K., & Lyberatos, G. (1999). Treatment of dairy wastewater using an upflow anaerobic sludge blanket reactor. *Journal of Agriculture and Engineering*, 73(1), 59-63.
- Gil, M. A., Gil, M., Giraldo, F. J., Millán, L., Sánchez, G. L., & Villada, E. (Julio-Diciembre de 2009). Aprovechamiento del suero lácteo de una empresa del norte antioqueño mediante microorganismos eficientes. *Producción más Limpia*, 4(2).
- González, S., Hospido, A., Moreira, M. T., Feijoo, G., & Arroja, L. (2013). Environmental Life Cycle Assessment of Galician Cheese: San Simon da Costa. *Journal of Cleaner Production*, 253-262.
- Granados Rojas, L., & Álvarez López, C. (2007). *Estudio Técnico de la Denominación de origen del queso Turrialba*. San José.
- Gutierrez, J., Enemna, P., & Polanco, F. (1991). Anaerobic Treatment of cheese production wastewater using a UASB reactor. *Biosource Technology*, 271-276.
- Hassan, A., & Nelson, B. (2012). Invited review: Anaerobic fermentation of dairy food wastewater. *American Dairy Science Association*, 6188-6203.
- Hernández, Y. (2013). Producción más Limpia en el Sector Biotecnológico. *Journal of Technology Management & Innovation*(8), 298-309.
- INEC. (2011). *INEC Costa Rica*. Recuperado el 3 de Noviembre de 2014, de <http://www.inec.go.cr/Web/Home/GeneradorPagina.aspx>
- Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica. (2010). *Norma general para el queso no madurado, incluido el queso fresco*. San José: INTECO.
- Janczulowicz, W., Zielinski, M., & Debowski, M. (Agosto de 2008). Biodegradability evaluation of dairy effluents originated in selected sections of dairy production. *Bioresource Technology*, 99(10), 4199-4205.

- Jímenez, J. (1991). *Determinación Experimental de los parámetros de diseño de un reactor anaerobio híbrido de flujo ascendente*. Proyecto de Graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Civil, San José, Costa Rica.
- Kalyzhnyi, S., Perez Martínez, E., & Rodríguez Martínez, J. (1997). Anaerobic Treatment of High-Strength Cheese-Whey Wastewater in Laboratory and Pilot UASB-Reactors. *ELSEVIER*, 59-65.
- Karadag, D., Emre Koroglu, O., Ozkaya , B., & Cakmakci, M. (Febrero de 2015). A review on anaerobic biofilm reactors for the treatment of dairy industry wastewater. *A review on anaerobic biofilm reactors for the treatment of dairy industry wastewater*, 50(2), 262-271.
- Kato, M. (1999). Configurações de Reactores Anaerobios. En PROSAB, *Tratamento de Esgotos Sanitários por processo Anaeróbico e Disposição Controlada no solo*. Río de Janeiro.
- Kim , D., Thoma, G., Ulrich, R., Nutter, D., & Milani, F. (2014). Life Cycle Assessment of Cheese Manufacturing in the United States. *9th International Conference of Food San Francisco, USA 8-10 October 2014*. San Francisco.
- León, F. C. (2005). *Estudio de los Reactores UASB para el tratamiento de Lixiviados del Relleno Sanitario La Esmeralda*. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de la Ingeniería y Arquitectura, Colombia.
- Lopetegui, J., Soroa, S., Almandoz, A., & García, J. (2005). Diseño de reactores híbridos anaerobios para el tratamiento de aguas residuales industriales. *Tecnología del agua*, 60-67.
- Magaña, A. (1985). *Reactores Híbridos para el tratamiento integral del agua residual porcícola*. Universidad Autónoma de Yucatán, Facultad de Ingeniería, Mérida.
- Malaspina, F., & et al. (15 de Noviembre de 1995). Anaerobic Treatment Of Cheese Whay With a Downflow-Upflow Hybrid Reactor. *Bioresource*, 131-135.
- Ministerio de Ambiente y Energía. (2007). *Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales N° 33601-MINAE-S*. San José: La Gaceta.

- Mirabella, N., Castellani, V., & Sala, S. (6 de Noviembre de 2013). Current options for the valorization of food manufacturing waste: a review. *Journal of Cleaner Production*, 28-41.
- Mockaitis, G., Ratusznei, S., Rodrigues, J., Zaiat, M., & Foresti, E. (abril de 2006). Anaerobic whey treatment by a stirred sequencing batch reactor (ASBR): effects of organic loading and supplemented alkalinity. *Journal of Environmental Management*, 79(2), 198-206.
- Morales, A., & Gurza, F. (2002). *Elaboración de una bebida como alternativa al manejo del suero lácteo*. Trabajo de graduación presentado como requisito parcial para optar por el título de Ingeniero Agrónomo con el grado de Licenciatura., Universidad EARTH, Ingeniería Agrícola, Guácimo.
- Mrunalini, P. (07 de febrero de 2013). Review On Applications of UASB Technology for wastewater treatment. Kolhapur, India.
- Najafpour, G., Hashemiyeh, B., Asadi, M., & Ghasemi, M. (2008). Biological Treatment of Dairy Wastewater in an Upflow Anaerobic. *American-Eurasian J. Agric. & Environ. Sci*, 4(2), 251-257.
- Navarro, M. (1995). *Caracterización química y microbiológica del queso fresco Turrialba en diez queseras de Santa Cruz de Turrialba*. San José, Costa Rica.
- Oviedo, M. (2008). *Identificación de Riesgos Microbiológicos asociados al consumo de queso artesanal que se comercializa en las ferias del agricultor*. San José.
- Pérez, A. (2007). Evaluación y optimización de un filtro anaerobio en escala real para el tratamiento de aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca. *Tesis de grado para la obtención del título de Msc, Ingeniera Sanitaria y Ambiental*. Santiago de Cali, Colombia.
- Pérez, A., & Torres, P. (2008). Índices de alcalinidad para el control del tratamiento anaerobio de aguas residuales fácilmente acidificables. *Ingeniería y Competitividad*, 10(2), 41-52.
- Pérez, Y., & Villegas, O. (2004). *Diseño Teórico de un Reactor Híbrido Mediante Sistemas No Convecionales Para el Tratamiento de las Aguas Residuales*. Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil, Instituto Plitécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, México D.F.

- Prazeres, A., Calvalho, F., & Rivas, J. (19 de Junio de 2012). Cheese Whey Management: A review. *Journal of Environmental Management*, 110, 48-68.
- Producción más limpia en el sector biotecnológico. (s.f.). *Journal of Technology Management* \$.
- Qasim, W., & Mane, A. (27 de Septiembre de 2013). Characterization and treatment of selected food. *Water Resources and Industry*, 4, 1-12.
- Rivera, F. (20 de Junio de 2012). Denominación de origen del queso Turrialba en la cadena de la producción y la comercialización. *Perspectivas Rurales*, 10(20), 101-113.
- Riviera, A., Gonzáles, J., Castro, R., Nieves, B., & Guerrero, G. (Julio de 2002). Tratamiento de Efluentes de Destilería en un Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 131-137.
- Ruiz, C. (2002). *Aplicación de digestores anaerobios discontinuos en el tratamiento de aguas residuales industriales*. Sevilla.
- Saleh, M., & Mahmood, U. (2004). Anaerobic Digestion Technology For Industrial Wastewater Treatment. *Eight International Water Technology Conference*. Alexandria.
- Sarathi Majumder, P., & Gupta, S. (2009). Effect of influent pH and alkalinity on the removal of chlorophenols in sequential. *Biosource Technology*, 1881-1883.
- Shehar, I. (2006). *Environmental Biotechnology*. Mumbai: I.K. International Pvt.Ltd.
- Stamatelatou, K., Giantsiou, N., Diamantis, V., Alexandridis, C., Alexandridis, A., & Aivasidis, A. (2012). Anaerobic digestion of cheese whey wastewater through a two stage system. *3RD INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL AND HAZARDOUS WASTE MANAGEMENT*. Creta.
- Strydom, J., Britz, T., & Mostert, J. (1997). Two-phase anaerobic digestion of three different dairy effluents using a hybrid bioreactor. *Water SA*, 23, 151-156.
- Torres, P. (23 de Diciembre de 2004). Tratamiento de aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca en filtro anaerobio: influencia del medio de soporte. *Scientia et Technica*, 75-80.
- Torres, P., Pérez, A., Cajigas, A., Jurado, C., & Ortiz, N. (2007). Selección de Inóculos para el Tratamiento Anaerobio de Aguas Residuales para el Proceso de Extracción

- de Almidón de Yuca. *Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal.*, 105-111.
- Vasileios , D., Anastasios G., K., Spyridon , N., Vasiliki , T., Paraschos , M., & Alexander Aivasidis. (10 de Enero de 2014). Two-Stage CSTR-UASB digestion enables superior and alkali addition-free cheese whey treatment. *Biochemical Engineering Journal*, 84, 45-52.
- Vidal, G., Carvalho, A., Méndez, R., & Lema, J. (5 de Enero de 2000). Influence of the content in fats and proteins on the anaerobic biodegradability of dairy wastewater. *Bioresource Technology*, 74, 231-239.
- Villegas, L. (Diciembre de 1995). Conctaminación de Industrias Lácteas. *Anales de la Academia de Ciencias Veterinarias de Andalucía Oriental*, 8.
- Vlyssides, A., Barampouti, E., Mai, S., & Tsimas, E. (5 de Septiembre de 2009). Anaerobic Digestion chemically pretreated wastewater from a cheese making factory. *Proccedings of the 11 Internacional Conferencie on Environmental Sciencie and Technology*. Crete, Greece.
- Yan, J., Lo, K., & Liao, P. (1990). Anaerobic digestion of cheese whey using an upflow anaerobic sludge III. Sludge and substrate profiles. *Biomass*, 21, 257-271.
- Yucheng, L., Fan, L., Liming , S., & Pinjig, H. (21 de Marzo de 2013). Influence of bicarbonate buffer on the methanogenetic pathway during thermophilic anaerobic digestion. *Bioresource Technology*, 137, 245-253.
- Zumbado, W. (2005). *Selección de una especie de levadura para la producción de proteína unicelular utilizando como sustrato el suero residual del proceso de elaboración de queso blanco tipo Turrialba*. San José: Universidad de Costa Rica.

7 APÉNDICES

APÉNDICE 1: METODOLOGÍA UTILIZADA DURANTE EL PROYECTO.

Cuadro 7-1. Guía de pre diagnóstico de las queseras

Aspectos	Queseras				
	Quesera 1	Quesera 2	Quesera 3	Quesera 4	Quesera 5
Quesera					
Horario	3:00-14:00	2:00-14:00	(3:00-12:00) am/ (4-8) pm	(6:00-7:14)am / (15:00-16:30) pm	4:00-14:00
Fallas en la producción	Diversos puntos, se les da seguimiento	No significativos	Realización de cuajos	Falta de estandarización	1 kg diario de queso.
Nivel de optimización	Medio	Medio	Medio	Bajo	Bajo
Volumen de Ventas/ingresos (Semanales)	4100 kilos.	50 millones de colones mensual neto	-	-	600 mil colones/semana en utilidades
Número de Empleados	Familiar 6	5	2	Familiar 3	5
Volúmenes de producción	4100 kilos/semana	7000 kilos/semana	-	270 kilos/ semana	3500 kilos/semana
Clientes	Intermediarios	Intermediarios	Automercado	Negocios, casas, pulperías, ferias	Perimercados, pulperías y carnicería
Leche propia	60% se compra	Se compra toda	Se compra toda	Propia, pero compran queso para cubrir la demanda	Compran toda
Política Ambiental	Metas pequeñas, no hay política	No	No existe	No, pero trabajar mucho en materia de ambiente	No
Se ha realizado anteriormente una auditoría ambiental	Entidades del Gobierno	No	No	Sí, por la Universidad Nacional	Senasa y los de Ministerio Salud
Dónde hay posibilidad de mejoras	Limpieza	Estructuras, manejo agua.	En el transporte de los insumos	En la elaboración de una receta estándar	Obtención de la leche y manejo del suero.
Hay un uso eficiente de la energía	No	Poco	Sí	Sí	Los dueños aseguran, que no hay forma.
Materia prima más costosa	Leche	Leche	Leche/ Cuajo	Electricidad/ Concentrado	Leche
Tipo de energía	Electricidad	Electricidad	Electricidad	Gas/ Electricidad	Electricidad y Diesel
Pago de la electricidad (col)	210000/mes	450000/mes	-	33500/mes	168000/mes
Se contabiliza	Sí	Sí	Sí	No	Sí
Problemas de Salud	No	Sí, gripe	Dolor de espalda	No	No
Se les ha informado sobre la higiene y la seguridad laboral.	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Equipos protectores	Sí	Sí	Sí	Sí	Si
Estudios de riesgos	No	No	No	Sí, pero no cuentan con los resultados	No
Traslado excesivo de insumos	No	Poco	Sí	No	No mucho,
Pérdidas durante el traslado	Pocas	Insignificante	Sí	Insignificante	Insignificante.
Medios de transporte	No transportan	1 camión con refrigeración,1	1 Camión con refrigerador y	1 Camión refrigerador y un	1 Camión refrigeración.

		camión cisterna y 2 carros	dos carros	carro	
Cómo escogen las rutas	NA	Dependiendo de a quien la demanda	Sin planificación	Sí, con experiencia.	Perimercados las designa.
Consumo de agua	Naciente	Naciente	No hay medidor	No hay medidor	No hay medidor
Vapor o agua caliente	Sí: Pasteurización y limpieza	Sí: Pasteurización y limpieza	Sí: Limpieza	Sí: Limpieza	Sí: Pasteurización y limpieza
Volumen de leche (L/ semana)	25000	43000	1300	1600	-
Volumen del suero (L/día)	1000	4800	-	-	3500
Cámaras de enfriamiento	2 grande y un tanque de enfriamiento de 4000 L	1	2 pequeñas y una cámara de maduración	2 pequeño	1
Material del piso	Cerámica antideslizante con fragua epóxica	Cemento	Cerámica con fragua epóxica	Cerámica con fragua epóxica	Cuarrentai, piso lujado
Material de las mesas de trabajo	Acero inoxidable	Acero inoxidable	Acero inoxidable	Acero inoxidable	Acero inoxidable
Existencia de ventilación	Sí	No	Poca	Sí	Extractor
Condición higiénica del equipo/ personas	Buena	Buena	Buena	Buena	Buena
Sistema de tratamiento de las aguas	Trampas de grasas y va a una quebrada, ineficiente.	No hay	Tres trampas de grasas, tanque séptico y un drenaje, ineficiente	Tanque con bacteria EMS que da riego al pastizal.	Agua enfriamiento va al caño y el resto va a los tanques con EMS y filtros anaerobios..
Qué se hace con el suero	Cerdos	Cerdos	Cerdos	Cerdos y terneras	Ganado

APÉNDICE 2: FOTOGRAFÍAS DE EQUIPO Y PROCESOS.



Figura 7-1. Difusor de estereofón.



Figura 7-2. Difusor de PVC



Figura 7-3. Pruebas de actividad metanogénica con adición de alcalinizante y nutrientes

APENDICE 3: RESULTADO OBTENIDOS.

Cuadro 7-2. Índices de alcalinidad para los efluentes de R1 y R2.

Fecha	R1			R2		
	Indice (AI/AP)	Indice Buffer	Indice Alfa	Indice (AI/AP)	Indice (AI/AT)	Indice Alfa
20-abr	0.61	0.38	0.62	0.72	0.42	0.58
27-abr	0.21	0.18	0.82	0.35	0.26	0.74
30-abr	0.40	0.29	0.71	0.13	0.12	0.88
04-may	0.50	0.33	0.67	0.94	0.48	0.52
06-may	1.40	0.58	0.42	1.20	0.55	0.45
08-may	1.00	0.50	0.50	0.89	0.47	0.53
11-may	6.00	0.86	0.14	15.00	0.94	0.06
14-may	14.00	0.93	0.07	0.00	1.00	0.00
18-may	13.00	0.93	0.07	10.67	0.91	0.09

Cuadro 7-3. Valores de DQO (mg/L) del influente, R1 y R2.

Fecha	Influente	DQO (mg/L)	
		R1	R2
17-abr	5961± 415	0	0
20-abr	3899 ± 235	4700 ± 400	63240 ± 468
24-abr	5000± 347	3623± 253	3574± 249
28-abr	5000± 431	2236± 163	2098± 154
30-abr	6274 ± 397	2236± 163	692± 52
08-may	20475± 1277	3295± 163	6214± 446
11-may	20475± 1277	7527± 701	11987± 94
14-may	17851± 1277	20847± 1486	19671 ± 1486.00
18-may	43099± 3232	16423± 1208	17531± 1276
Promedio	14233	6765.	7565.67.
Desviación estándar	12175	6709	6823.81