

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COSTA RICA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y EL MAR
ESCUELA DE CIENCIAS AMBIENTALES

**EVALUACIÓN DE LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE
AGUAS RESIDUALES EN BENEFICIOS DE CAFÉ, EN TÉRMINOS
DE SUS EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO**

Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Gestión Ambiental con énfasis en Ingeniería
Sanitaria

Presentado por
NATHALY FUENTES JIMÉNEZ

Heredia, 2019

Trabajo de graduación aprobado por el Tribunal Examinador de la Escuela de Ciencias Ambientales de la Universidad Nacional, para optar al grado de Licenciatura en Gestión Ambiental con énfasis en Ingeniería Sanitaria.

MIEMBROS DEL TRIBUNAL EXAMINADOR

.....
M.Sc. Tomás Marino Herrera
Decano de la Facultad de Ciencias de la Tierra y el Mar

.....
M.Sc. José Félix Rojas Marín
Representante de la
Escuela de Ciencias Ambientales

.....
M.Sc. Roy Pérez Salazar
Tutor

.....
Ing. Rolando Chacón Araya
Lector

.....
Ing. José Emil De la Rocha Valverde
Lector

.....
Bach. Nathaly Fuentes Jiménez
Postulante

A mis padres Rodrigo Fuentes Acosta y Marlenne Jiménez Rodríguez, quienes siempre han sido mis mayores admiradores y quienes se encargan todos los días de recordarme que de la mano de Dios todo es posible.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por darme la oportunidad de vivir esta experiencia y brindarme un aprendizaje para cada momento y detalle.

A mi Padre, a mi Madre y toda mi familia por siempre estar ahí, por todo su apoyo, sus consejos y por impulsarme a seguir adelante, aunque todo parezca difícil.

A David, por ser mi palanca y mi punto de apoyo; por ser una persona a la que admiro y con la que cada día aprendo a ser mejor.

A Sophie por ser mi fiel compañera, capaz de convertir las lágrimas en sonrisas y el estrés en esperanza.

A mi Tutor Roy Pérez Salazar, por todo el esfuerzo realizado y las horas extras dedicadas al acompañamiento y consejería a lo largo de todo este gran proyecto.

A mis lectores José Emil De la Rocha Valverde, Rolando Chacón Araya y Jorge Herrera Murillo, por siempre estar dispuestos a colaborar y aportar sus conocimientos para la mejora del proyecto.

A Fundecooperación, quienes aportaron los recursos económicos que hizo posible esta investigación.

Al Icafe, quienes me acompañaron en todo el proceso de muestreos, especialmente a Joseph Rodríguez, por siempre estar dispuesto a compartir su conocimiento y colaborar en todo momento, a Jorge Chavarría, José Alberto Castillo, David Rodríguez, Alexander, Mauricio y a toda la Unidad de Industrialización.

A todo el personal del Laboratorio de Análisis Ambiental quienes compartieron conmigo la experiencia completa de esta investigación, especialmente a Roosevelt Sevilla, María José Paniagua, Cristian Núñez, a quienes no tengo palabras para agradecerles todo el apoyo y las experiencias vividas, por las historias y la música que hicieron que la sed, el hambre, el sol y la lluvia fueran tan sólo el complemento de una de las mejores experiencias de mi vida. A Víctor Beita, Félix Rojas, Rodrigo Chinchilla por toda la ayuda brindada y la transferencia desinteresada de conocimiento, a Ernesto Moreira, Carolina Balma, Diego Sánchez por pasar horas y horas ayudándome con los análisis de las muestras, a José Ramírez por enseñarme y ayudarme a arreglar los que equipos, a Noelia Montenegro, Darling Oviedo por nunca negarse a brindarme la mano y prepararme los materiales para los muestreos.

A los encargados de los STAR en los Beneficios: Minor Barrantes, Marco Alfaro, César Zamora, Guillermo Arias, Víctor Hugo Sancho, Cristian Chavarría, Roger Matamoros, Walter Vargas, William Vargas, Rolando Vásquez, José Antonio Vega, Jorge Ulate, quienes estuvieron dispuestos a colaborar en todo momento. A Armando Jara, Roy Solís, Juan Rafael Murillo, Esteban Zamora, Martín Ceciliano y a todos los Beneficios que nos abrieron las puertas para la realización de esta investigación.

A Ericka, Margoth, Orfilia, Mary, Hairo y todas las personas que nos proporcionaron el alimento y hospedaje durante los muestreos, sin importar nuestro aspecto sucio y olor desagradable, luego de cada jornada.

A Karlita, Tyta y Jeani, que siempre han estado ahí para ayudarme y apoyarme en lo que sea necesario, recordándome cuán valiosa es la amistad.

RESUMEN

Este proyecto de graduación evaluó los tipos de sistemas de tratamiento de aguas residuales (STAR) de mayor utilización en los Beneficios de café de Costa Rica, de acuerdo con las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) generadas por estos, además se analizó la viabilidad técnica, económica y ambiental de los diversos sistemas estudiados, como respuesta a la necesidad de encontrar un STAR que genere baja emisión de GEI y que al mismo tiempo mantenga la eficiencia. Esto con el objetivo de reducir el aporte al calentamiento global y evitar la contaminación de los cuerpos de agua.

Lo anterior se realizó mediante un diagnóstico de los STAR y mediciones de flujo de emisión de metano, dióxido de carbono y óxido nitroso, con la técnica de cámara estática de flujos, aplicado a nueve Beneficios ubicados en diferentes zonas geográficas, altitudes, con distinta capacidad de procesamiento y tipo de sistema de tratamiento.

El campo de aspersión sobre pasto estrella mostró ser el sistema de menor emisión de GEI, con un valor de 4 kilogramos de dióxido de carbono equivalente por fanega procesada ($\text{kg CO}_2\text{e/ff}$), respecto a las lagunas anaerobias con $14 \text{ kg CO}_2\text{e/ff}$ y los reactores anaerobios con $400 \text{ kg/CO}_2\text{e/ff}$, debido a que en aspersión el proceso se realiza mediante degradación aerobia.

En la viabilidad de implementación del STAR, los campos de aspersión mostraron una ventaja sobre las lagunas y reactores, principalmente por su capacidad de tratamiento, facilidad de manejo de lodos, flexibilidad al cambio de las características del efluente, poca necesidad de personal, bajo costo de construcción, eficiencia en el recurso hídrico y baja emisión de GEI.

Sin embargo, cada tipo de STAR tiene ventajas y desventajas que deben ser analizadas por quien desee implementarlos, para desarrollar el que mejor se ajuste a las necesidades.

CONTENIDOS

| | |
|---|------|
| RESUMEN..... | i |
| CONTENIDOS..... | ii |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | v |
| ÍNDICE DE CUADROS..... | vii |
| ÍNDICE DE APÉNDICES..... | viii |
| ÍNDICE DE ANEXOS..... | x |
| LISTA DE SIGLAS, ACRÓNIMOS y ABREVIATURAS..... | xi |
| INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 1.1. ANTECEDENTES | 1 |
| 1.2. JUSTIFICACIÓN | 3 |
| 1.3. OBJETIVOS | 6 |
| 1.3.1. Objetivo general | 6 |
| 1.3.2. Objetivos específicos | 6 |
| 2. MARCO TEÓRICO | 7 |
| 2.1. Cambio climático como realidad mundial..... | 7 |
| 2.2. Agricultura: protagonista del calentamiento global..... | 7 |
| 2.3. Café como actor importante de la agricultura..... | 9 |
| 2.4. Tipos de procesamiento del café..... | 9 |
| 2.4.1. Procesamiento seco: | 9 |
| 2.4.2. Procesamiento húmedo: | 10 |
| 2.5. Problemas ambientales de la industria cafetalera..... | 12 |
| 2.6. Tratamiento de las aguas residuales..... | 14 |
| 2.6.1. El tratamiento primario: | 15 |
| 2.6.2. El tratamiento secundario: | 15 |
| 2.6.3. El tratamiento terciario: | 15 |
| 2.7. Tratamiento de las aguas residuales de Beneficios de café..... | 15 |
| 2.7.1. Lagunas anaerobias: | 16 |
| 2.7.2. Lagunas aerobias: | 16 |
| 2.7.3. Digestión anaerobia: | 17 |
| 2.7.4. Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (RAFA): | 18 |
| 2.7.5. Tanque de oxidación: | 19 |

| | |
|--|-----|
| 2.7.6. Drenajes: | 19 |
| 2.7.7. Aspersión sobre pasto estrella: | 20 |
| 2.8. Emisiones de GEI en los STAR..... | 20 |
| 2.8.1 Degradación aerobia: | 20 |
| 2.8.2 Degradación anaerobia: | 21 |
| 2.9 Acciones de mitigación en el sector cafetalero | 22 |
| 2.9.1. Reducción de uso de fertilizantes nitrogenados | 23 |
| 2.9.2. Uso eficiente del agua y energía en el beneficiado de café: | 23 |
| 2.9.3. Programa de fomento de sistemas agroforestales: | 23 |
| 3. MARCO METODOLÓGICO | 24 |
| 3.1. Enfoque de la investigación..... | 24 |
| 3.2. La población y la muestra..... | 24 |
| 3.3. El tipo de muestreo | 25 |
| 3.3.1. Zona geográfica del país: | 25 |
| 3.3.2. Altitud de la zona: | 25 |
| 3.3.3. Tipo de Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales: | 26 |
| 3.3.4. Capacidad de procesamiento: | 26 |
| 3.4. Sitios de estudio | 26 |
| 3.5. Instrumentos y técnicas | 30 |
| 3.6. Procedimiento metodológico..... | 31 |
| 3.6.1. Etapa I. Diagnóstico | 31 |
| 3.6.2. Etapa II. Medición de generación de gases de efecto invernadero | 32 |
| 3.6.3. Etapa III. Análisis de la viabilidad técnica, económica y ambiental de los STAR. | 42 |
| 4. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS | 52 |
| 4.1. Etapa I: Diagnóstico | 52 |
| 4.2. Etapa II: Medición de generación de gases de efecto invernadero..... | 61 |
| 4.3. Etapa III: Análisis de la viabilidad técnica, económica y ambiental de los STAR..... | 75 |
| 4.3.1. Viabilidad técnica | 75 |
| 4.3.2. Viabilidad económica | 87 |
| 4.3.3. Viabilidad ambiental | 95 |
| 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 104 |
| 5.1 Conclusiones | 104 |
| 5.2. Recomendaciones..... | 106 |

| | |
|--|-----|
| 6. REFERENCIAS | 108 |
| 7. APÉNDICE | 122 |
| 7.1. Generalidades | 122 |
| 7.2. Beneficio Santa Rosa Ltda. | 129 |
| 7.3. Beneficio CoopeAgri R.L..... | 133 |
| 7.4. Beneficio CoopeAtenas R.L. | 137 |
| 7.5. Beneficio CoopeTarrazú R.L..... | 141 |
| 7.6. Beneficio CooproNaranja R.L..... | 145 |
| 7.7. Beneficio Hermanos Vargas Hidalgo | 149 |
| 7.8. Beneficio La Eva..... | 153 |
| 7.9. Beneficio Las Marías..... | 157 |
| 7.10. Beneficio Café de Altura de San Ramón Especial. | 161 |
| 7.11. Factores de emisión | 165 |
| 7.12. Viabilidad..... | 166 |
| 8. ANEXOS | 187 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 . Esquema del procesamiento seco de café. Fuente: Elaborado con base en Colón 1996. | 10 |
| Figura 2. Esquema del procesamiento húmedo de café. Fuente: Elaborado con base en Colón 1996. .. | 12 |
| Figura 3. Principales impactos ambientales del proceso productivo del café. | 14 |
| Figura 4. Diagrama de un reactor anaerobio de flujo ascendente. | 18 |
| Figura 5. Ubicación y tipo de STAR de los 27 Beneficios diagnosticados. | 29 |
| Figura 6 . Representación esquemática de la campana para la captura de los gases. | 37 |
| Figura 7. Porcentaje de Beneficios que realizan análisis fisicoquímicos en los afluentes..... | 52 |
| Figura 8. Porcentaje de Beneficios que reportan resultados de análisis fisicoquímicos de las aguas residuales. | 54 |
| Figura 9. Coincidencia del tipo de STAR inscrito en los Beneficios | 58 |
| Figura 10. Control de los Beneficios sobre la eficiencia de los STAR | 59 |
| Figura 11. Cumplimiento de las condiciones de muestreo de STAR de los Beneficios | 61 |
| Figura 13. Flujos promedio totales de los GEI (mg/m ² día) según la época de cosecha de los Beneficios de Café | 66 |
| Figura 14. Flujos promedio de los GEI (mg/m ² día) para distintos tipos de STAR según el período de cosecha de los Beneficios de Café..... | 67 |
| Figura 15. Factores de emisión de metano y dióxido de carbono en kilogramos por fanega procesada (kg/ff) según el STAR implementado | 68 |
| Figura 16. Porcentaje volumen-volumen %v/v de metano y dióxido de carbono generado por el reactor anaerobio de flujo ascendente del Beneficio La Eva S.A. | 70 |
| Figura 17. Porcentaje volumen-volumen %v/v de metano y dióxido de carbono generado por el reactor anaerobio de flujo ascendente del Beneficio Coopronaranja R.L. | 71 |
| Figura 18. Factores de emisión de óxido nitroso en miligramos por fanega procesada (mg/ff) según el STAR implementado..... | 72 |
| Figura 19. Emisiones de dióxido de carbono equivalente por fanega procesada según los distintos STAR..... | 74 |
| Figura 20. Coeficiente área de emisión del STAR/capacidad de procesamiento de café por cosecha .. | 76 |
| Figura 21. Promedio de la capacidad instalada de los STAR | 77 |
| Figura 22. Porcentaje de eficiencia de remoción de lagunas anaerobias y reactor anaerobio | 79 |
| Figura 23. Porcentaje del área total de emisión de cada STAR, donde se necesita extracción de lodos, según los Beneficios evaluados | 80 |
| Figura 24. Porcentaje de Beneficios que requieren o no personal exclusivo en el STAR..... | 82 |
| Figura 25. Promedio de la duración de la capacitación para operar los principales sistemas de tratamiento de aguas residuales de Beneficio de café..... | 83 |
| Figura 26. Promedio del tiempo de retención hidráulica de los diferentes STAR de los Beneficios estudiados..... | 84 |
| Figura 27. Costo de construcción e implementación de los STAR, en cada Beneficio analizado..... | 87 |
| Figura 28. Consumo eléctrico de los STAR pertenecientes a los Beneficios de café analizados. | 89 |
| Figura 29. Consumo eléctrico promedio de los STAR estudiados..... | 90 |
| Figura 30. Salario promedio de los operarios de los STAR en los Beneficios de café analizados | 91 |
| Figura 31. Promedio del costo anual de mantenimiento de los STAR pertenecientes a los Beneficios estudiados, expresado en colones/ff | 93 |

Figura 32. Consumo promedio de agua de los Beneficios participantes, asociado al tipo de STAR instalado99

Figura 33. Promedio de las emisiones de CO₂e/ff de los sistemas de laguna anaerobia, reactor anaerobio y aspersión sobre pasto estrella, pertenecientes a los Beneficios participantes del estudio. 101

Figura 34. Promedio de las emisiones de CO₂e/ff de los sistemas de laguna anaerobia y aspersión sobre pasto estrella, pertenecientes a los Beneficios participantes del estudio102

ÍNDICE DE CUADROS

| | |
|--|----|
| Cuadro 1. Ventajas y desventajas de las lagunas anaerobias | 16 |
| Cuadro 2. Ventajas y desventajas de los reactores anaerobios de flujo ascendente, en comparación con los sistemas aerobios convencionales. | 19 |
| Cuadro 3. Valores utilizados para la determinación del tamaño de la muestra de investigación. | 25 |
| Cuadro 4. Beneficios de café seleccionados para el diagnóstico del proyecto de investigación. | 26 |
| Cuadro 5. Herramientas utilizadas para realización del proyecto de investigación. | 30 |
| Cuadro 6. Cantidad de muestras y análisis realizados para cada unidad de los STAR de los Beneficios. | 33 |
| Cuadro 7. Descripción de las condiciones cromatográficas que se utilizaron para la determinación de la concentración de metano y óxido nitroso. | 38 |
| Cuadro 8. Variables estudiadas para el análisis de viabilidad técnica, económica y ambiental de los sistemas de tratamiento de agua residual de Beneficios de café | 42 |
| Cuadro 9. Método de análisis para la puntuación de las variables de la viabilidad técnica, económica y ambiental de los STAR evaluados..... | 46 |
| Cuadro 10. Tipo de sistema de tratamiento de aguas residuales, región cafetalera, zona productiva y etapas de la cosecha muestreadas, para cada uno de los nueve Beneficios en estudio | 62 |
| Cuadro 11. Unidades de los STAR excluidas del muestreo..... | 64 |
| Cuadro 12. Correlación de Spearman entre cada flujo de emisión y la temperatura ambiental del Beneficio Santa Rosa Ltda. | 74 |
| Cuadro 13. Características fisicoquímicas y biológicas que deben ser controladas en los STAR analizados..... | 86 |

ÍNDICE DE APÉNDICES

| | |
|---|-----|
| Apéndice 1. Cuestionario para el diagnóstico de los Sistemas de tratamiento de aguas residuales en los Beneficios de café. | 122 |
| Apéndice 2. Datos generales de los Beneficios diagnosticados en la Etapa I. | 124 |
| Apéndice 3. Ubicación de los Beneficios para la medición de emisiones de GEI. | 126 |
| Apéndice 4. Áreas de emisión de los STAR de los Beneficios analizados. | 127 |
| Apéndice 5. Información general del Beneficio Santa Rosa Ltda. | 129 |
| Apéndice 6. Puntos de muestreo realizados en el Beneficio Santa Rosa Ltda. | 130 |
| Apéndice 7. Diagrama de flujo del STAR del Beneficio Santa Rosa Ltda. | 131 |
| Apéndice 8. Imagen que ilustra el muestreo realizado en la laguna 1 del Beneficio Santa Rosa, en mayo del 2016. | 132 |
| Apéndice 9. Información general del Beneficio CoopeAgri R.L. | 133 |
| Apéndice 10. Puntos de muestreo realizados en el Beneficio CoopeAgri R.L. | 134 |
| Apéndice 11. Diagrama de flujo del STAR del Beneficio CoopeAgri R.L. | 135 |
| Apéndice 12. Imagen que ilustra el muestreo realizado en la laguna 8 del Beneficio CoopeAgri, en agosto del 2016. | 136 |
| Apéndice 13. Información general del Beneficio CoopeAtenas R.L. | 137 |
| Apéndice 14. Puntos de muestreo realizados en el Beneficio CoopeAtenas R.L. | 138 |
| Apéndice 15. Diagrama de flujo del STAR del Beneficio CoopeAtenas R.L. | 139 |
| Apéndice 16. Imagen donde se aprecian los puntos de muestreo en el tanque igualador del Beneficio CoopeAtenas, en enero del 2016. | 140 |
| Apéndice 17. Información general del Beneficio CoopeTarrazú R.L. | 141 |
| Apéndice 18. Puntos de muestreo realizados en el Beneficio CoopeTarrazú R.L. | 142 |
| Apéndice 19. Diagrama de flujo del STAR del Beneficio CoopeTarrazú R.L. | 143 |
| Apéndice 20. Imagen donde se aprecian tres de los puntos de muestreo en el campo de aspersión sobre pasto estrella, del Beneficio CoopeTarrazú, en abril del 2016. | 144 |
| Apéndice 21. Información general del Beneficio CooproNaranja R.L. | 145 |
| Apéndice 22. Puntos de muestreo realizados en el Beneficio CooproNaranja R.L. | 146 |
| Apéndice 23. Diagrama de flujo del STAR del Beneficio CooproNaranja R.L. | 147 |
| Apéndice 24. Imagen donde se aprecia el punto de toma de muestra del ducto de gas (dentro del círculo rojo), antes del llegar al quemador, en el Beneficio CooproNaranja, en febrero del 2016. | 148 |
| Apéndice 25. Información general del Beneficio Hermanos Vargas Hidalgo. | 149 |
| Apéndice 26. Puntos de muestreo realizados en el Beneficio Hermanos Vargas Hidalgo. | 150 |
| Apéndice 27. Diagrama de flujo del STAR del Beneficio Hermanos Vargas Hidalgo. | 151 |
| Apéndice 28. Imagen donde se aprecia un punto de muestreo realizado en el campo de aspersión sobre pasto estrella del Beneficio Hermanos Vargas Hidalgo, en febrero del 2016. | 152 |
| Apéndice 29. Información general del Beneficio La Eva. | 153 |
| Apéndice 30. Puntos de muestreo realizados en el Beneficio La Eva. | 154 |
| Apéndice 31. Diagrama de flujo del STAR del Beneficio La Eva. | 155 |
| Apéndice 32. Imagen donde se aprecian dos de los puntos de muestreo, en el reactor anaerobio del sistema de tratamiento de aguas residuales del Beneficio La Eva, en enero del 2017. | 156 |
| Apéndice 33. Información general del Beneficio Las Marías. | 157 |
| Apéndice 34. Puntos de muestreo realizados en el Beneficio Las Marías. | 158 |

| | |
|---|-----|
| Apéndice 35. Diagrama de flujo del STAR del Beneficio Las Marías. | 159 |
| Apéndice 36. Imagen donde se aprecia uno de los puntos del muestreo realizado en el campo de aspersión sobre pasto estrella, en el Beneficio Las Marías, en enero del 2017. | 160 |
| Apéndice 37. Información general del Beneficio Café de Altura de San Ramón Especial S.A. | 161 |
| Apéndice 38. Puntos de muestreo realizados en el Beneficio Café de Altura de San Ramón Especial S.A. | 162 |
| Apéndice 39. Diagrama de flujo del STAR del Beneficio Café de Altura. | 163 |
| Apéndice 40. Imagen que ilustra el momento de la toma de una muestra, en el campo de aspersión sobre pasto estrella del Beneficio Café de Altura de San Ramón Especial, en octubre del 2016. | 164 |
| Apéndice 41. Factores de emisión de los STAR estudiados. | 165 |
| Apéndice 42. Ejemplo del cuestionario aplicado a los Beneficios para el análisis de viabilidad. | 166 |
| Apéndice 43. Información recopilada a partir de las respuestas del cuestionario para el análisis de la viabilidad. | 172 |
| Apéndice 44. Validación de la importancia de las variables para el análisis de viabilidad. | 181 |
| Apéndice 45. Matriz de viabilidad técnica, económica y ambiental de los STAR analizados. | 185 |

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Tabla para determinar número de puntos de muestreo de acuerdo al área de emisión.187

LISTA DE SIGLAS, ACRÓNIMOS y ABREVIATURAS

CATIE: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza

CH₄: metano

CMNUCC: Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático

CO₂: dióxido de carbono

CO₂e: dióxido de carbono equivalente

DBO: demanda bioquímica de oxígeno por 5 días a 20 grados centígrados

DQO: demanda química de oxígeno

ECA: Ente Costarricense de Acreditación

ENCC: Estrategia Nacional de Cambio Climático

FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura

ff: fanega procesada

FID: detector de ionización de llama

GEI: gases de efecto invernadero

HDPE: polietileno de alta densidad

HFC: hidrofluorocarburos

Icafe: Instituto del Café de Costa Rica

IMN: Instituto Meteorológico Nacional

IPC: índice de precios al consumidor

IPCC: Panel Intergubernamental para el Cambio Climático

LAA: Laboratorio de Análisis Ambiental

MAG: Ministerio de Agricultura y Ganadería

MINAE: Ministerio de Ambiente y Energía

N₂O: óxido nitroso

NAMA: Acciones de Mitigación Nacionalmente Apropriadas

PFC: perfluorocarbonos

PV: puntaje de variable

PVC: policloruro de vinilo

RVRAR: Reglamento de vertido y reúso de aguas residuales

SF₆: hexafluoruro de azufre

STAR: sistema de tratamiento de aguas residuales

TM: toneladas métricas

UCR: Universidad de Costa Rica

UNA: Universidad Nacional de Costa Rica

μECD: micro-detector de captura electrónica

INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

A nivel internacional, la conferencia de Estocolmo en 1972 marcó el inicio de una era de preocupación-ocupación, consensos, legislación y concientización en este ámbito, según Cantú (2015). Y es en esta conferencia, organizada por las Naciones Unidas y en el que participaron 113 estados, donde se establecieron algunos principios, por ejemplo, que los recursos naturales debían ser preservados en beneficio de las presentes y futuras generaciones (ONU 2015).

Posterior a esto, y después de otras conferencias como la realizada en Río de Janeiro en 1992, se llevó a cabo la negociación del Protocolo de Kioto sobre el Cambio Climático, acuerdo que busca reducir las emisiones globales de gases de efecto invernadero (GEI), enfocándose en dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC), trifluoruro de nitrógeno (NF₃) y hexafluoruro de azufre (SF₆) (CMNUCC, 2013). Este protocolo fue adoptado en 1997, pero entró en vigor hasta en el año 2005 y es parte de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) (CMNUCC 2014).

Para el 2010, la CMNUCC, debido a la preocupación por los datos arrojados en el Cuarto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC), que indicaba un aumento del 70% de los GEI entre 1970 y 2004, crea las NAMA (Acciones de Mitigación Nacionalmente Apropriadas), donde las partes se comprometieron a emprender acciones para reducir las emisiones al 2020 (CMNUCC 2014).

Por su parte, Costa Rica desde los años 30 ya mostraba preocupación por el deterioro ambiental causado por algunas actividades, como el beneficiado de café; es por esto que en 1936 se publica el Reglamento de Beneficios de Café N° 4, donde se prohibía la descarga de cascarilla o broza a los cuerpos de agua (Sagot 2012).

Más adelante, para 1942 entró en vigor la Ley de aguas N° 276, que entre otros aspectos regula la zona de protección de los cauces de ríos, así como la utilización del recurso hídrico bajo concesión, para abastecimiento del beneficiado de café (Congreso Constitucional de la República de Costa Rica 1942).

El país fue más allá, en 1997 y desarrolló el Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales N° 33601, que regula los vertidos de todas las actividades que producen aguas residuales, incluyendo los Beneficios de café; asimismo, al tratamiento de las aguas residuales de estos, antes de ser vertidas a un cuerpo receptor, y establece los parámetros máximos de contaminantes que deben estar presentes (MINAE 2010).

Después de esto, en el 2006 el Gobierno presentó el programa Paz con la Naturaleza, mediante el cual el país, iniciando por el Poder Ejecutivo, se comprometía a ser C-Neutral para el año 2021 (MINAE 2015). Y para cumplir con esta iniciativa, se creó la oficina de la Estrategia Nacional de Cambio Climático (ENCC), buscando sistematizar acciones sobre el cambio climático (MINAE 2015).

Bajo el marco de la Iniciativa Paz con la Naturaleza, y como parte de uno de los ejes estratégicos de la ENCC, en el 2011 el Instituto del Café de Costa Rica (Icafe) y el sector cafetalero del país, junto con el Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE), el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) y Fundecooperación para el desarrollo sostenible, decidieron

crear e implementar el primer NAMA de café en el mundo, con el cual buscan emprender acciones para disminuir las emisiones de GEI generadas por las actividades de este sector de la agricultura y con la visión de ayudar al país a convertirse en carbono neutral para el 2021 (Icafe 2012).

Para esto se crearon alianzas con instituciones públicas y centros de investigación como el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), la Universidad de Costa Rica (UCR) y la Universidad Nacional de Costa Rica (UNA), dentro de la cual el Laboratorio de Análisis Ambiental tiene la tarea de desarrollar diversos estudios en la temática, uno de los cuales es el presente proyecto.

1.2. JUSTIFICACIÓN

Desde hace algunas décadas el cambio climático ha sido una temática de gran discusión a nivel mundial, así como sus causas, consecuencias y acciones para evitar su aceleración. Junto con este tema, se ha estudiado ampliamente el calentamiento global, como uno de los principales causantes del cambio climático.

A partir de esto se han creado regulaciones, tanto a nivel internacional como nacional, para controlar las emisiones de sustancias que generan que este proceso natural se esté dando en cantidades no naturales y provocando fenómenos como, según Picón *et al.* (2014), aumento de la temperatura de los mares, de la lluvia en algunos lugares del planeta y de sequías extremas en otros, así como el derretimiento de los polos.

El presente documento se centra en los principales GEI emitidos por las actividades antropógenicas a nivel mundial, a saber, el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O) (Saynes *et al.* 2016).

El CO₂ es un gas importante que regula el calentamiento global de la superficie de la Tierra, además de que es la primera fuente de carbono para la vida y el medio de transferencia de carbono más rápido de la naturaleza (IPCC, citado por Correa 2016).

El N₂O tiene un potencial de calentamiento global 298 veces más grande que el CO₂, además de que participa en la formación de ozono atmosférico. (IPCC, 2016). Este gas se genera como producto intermedio en los procesos de nitrificación y desnitrificación (Liikanen, citado por Correa 2016).

Uno de los gases de efecto invernadero (GEI) que más se produce en el país es el metano (CH₄), el cual tiene un potencial de calentamiento global 21 veces más poderoso que el CO₂ (IMN 2017). Este gas se produce, de acuerdo con Allen, citado por Correa (2016), principalmente a partir de procesos de descomposición en ausencia de oxígeno, cuyas principales fuentes antropogénicas son la ganadería, la quema de biomasa y los arrozales, así como sistemas de tratamiento de desechos anaerobios.

Los procesos de tratamiento de aguas residuales pueden contribuir a generar gases de efecto invernadero a través de la producción de CO₂ y CH₄, desde los procesos en sí o desde la producción de CO₂ a partir de la energía requerida para el tratamiento. Respecto a esto, El-Fadel y Massoud, citados por Infante (2017) indican que el CH₄ producido por los sistemas de tratamiento de aguas residuales constituye el 5% del generado a nivel mundial.

Uno de los sectores del país que utiliza tratamiento anaerobio es el sector cafetalero, conformado por más de 210 Beneficios, distribuidos en las ocho regiones cafetaleras del país. Estos tratan las aguas residuales principalmente mediante sistemas anaerobios, los cuales presentan diversas ventajas, como su bajo costo o facilidad de manejo. No obstante, este tipo

de sistemas presentan la desventaja de que producen grandes cantidades de metano debido a la descomposición de la materia orgánica por parte de bacterias que trabajan en ambientes con bajo contenido de oxígeno (Sturm *et al.* 2014).

Según el Icafe (2012), la emisión de GEI de la actividad cafetalera del país, corresponde al 25% de las generadas por el sector agrícola. Además, representan un 9% de las generadas en la totalidad del país; sin embargo, estas son estimaciones, ya que no existen datos exactos de la generación de GEI en Beneficios de café en el país.

Por consiguiente, en instituciones como el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), el Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE), el Instituto del Café de Costa Rica (Icafe) y Fundecooperación para el Desarrollo Sostenible, surge la preocupación respecto al tema y la necesidad de encontrar las formas de tratar las aguas residuales generadas en la producción de café en el país, de manera que ayuden a reducir la cantidad de emisiones de GEI generadas actualmente. Por esto, bajo el marco de la ENCC, se crean las Acciones de Mitigación Nacionalmente Apropriadas (NAMA) en el sector café (proyecto con una inversión de \$30 000 000), para contribuir con la meta país de carbono neutralidad para el año 2021. Las NAMA café buscan reducir los aportes de emisiones de GEI provenientes de la actividad cafetalera mediante diversas iniciativas de reducción, mitigación y compensación en las diferentes etapas de producción del café.

Como parte de uno de los ejes de las NAMA café, el sector cafetalero plantea la posibilidad de convertir sus STAR convencionales en un nuevo sistema de tratamiento, de aspersión sobre pasto estrella, en el cual se presenta gran interés, debido a que ha mostrado ser más económico; además, no genera un vertido, ya que funciona como un lecho de secado. Sin

embargo, el sector desea determinar si este sistema es también más conveniente en términos de emisiones de GEI, hipótesis de la cual se deriva el presente proyecto.

La inversión de Fundecooperación al Icafe generó una alianza del LAA con la UNA para el desarrollo de un proyecto que evaluara los principales STAR utilizados en el sector café, con el fin de determinar cuál de ellos aporta menos emisiones de GEI a la atmósfera y así avanzar hacia los objetivos de las NAMA.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo general

Evaluar diferentes sistemas de tratamiento de aguas residuales en Beneficios de café, en términos de las emisiones gases de efecto invernadero para la determinación del sistema más viable.

1.3.2. Objetivos específicos

- a) Diagnosticar los sistemas de tratamiento de aguas residuales de distintos Beneficios del sector cafetalero del país para la obtención de una línea base de investigación.
- b) Determinar las tasas de generación de metano, óxido nitroso y dióxido de carbono, de distintas modalidades de tratamiento de aguas residuales para la identificación del sistema de menor emisión.
- c) Elaborar un análisis de viabilidad técnica, ambiental y económica del tratamiento de aspersión sobre pasto estrella, en comparación con los sistemas tradicionales de tratamiento de aguas residuales para la facilitación de la toma de decisiones.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Cambio climático como realidad mundial

A pesar de que existen algunas teorías que plantean el cambio climático como un evento totalmente natural, en el que la acción antropológica no tiene participación alguna; para el año 2007, en el Informe de Evaluación sobre el Cambio Climático, los expertos del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) afirmaron que la evidencia de un cambio climático y calentamiento global es inequívoca (IPCC 2014).

Además, el IPCC (2013) aseguró que el principal impulsor de la tendencia al calentamiento, son las emisiones antropogénicas de los GEI, incluyendo dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxidos de nitrógeno (NO_x) y halocarbonos. Todos estos, son gases con capacidad de atrapar el calor que debería salir de la atmósfera, generando un forzamiento radiativo, el cual crea un efecto en la atmósfera similar al calentamiento en un invernadero.

Según el IPCC, mencionado por CDKN y ODI (2014), tomando en cuenta los largos tiempos de residencia de estos gases, junto con sus tasas de emisión, se espera que la tendencia al calentamiento continúe y la temperatura promedio global aumente de 2,6 a 4,8°C. Sin embargo, el World Energy Council, mencionado por Thakkar (2014), señala que el calentamiento de la Tierra puede reducirse, pero para esto se deben disminuir las emisiones globales.

2.2. Agricultura: protagonista del calentamiento global

La FAO informó, en el año 2013, que el sector agropecuario en general contribuye sustancialmente a las emisiones de gases de efecto invernadero ya que es responsable de casi

el 30% de las emisiones globales de GEI de origen humano en la atmósfera, una contribución comparable a la del sector energético y muy por encima de las emisiones totales de transporte. La producción agropecuaria, es responsable de la mitad del metano y dos tercios del óxido nitroso emitidos a la atmósfera por la actividad humana.

La FAO (2014) también indicó que las emisiones generadas por el sector agrícola a nivel global han aumentado considerablemente en los últimos 50 años, siendo América Latina y el Caribe los contribuyentes del 17% de las emisiones agrícolas mundiales, las cuales se duplicaron en este medio siglo.

Sin embargo, así como la agricultura es uno de los contribuyentes a este evento, también es vulnerable a los impactos del cambio climático, ya que se ve afectada directamente por acontecimientos causados por este, como el aumento de las temperaturas, las precipitaciones más variables y el aumento de eventos climáticos extremos, que se espera que ocurran en los próximos 50 a 100 años (Mase 2014).

El aporte en las concentraciones de CO₂ al cambio climático se verá reflejado en la producción agrícola a través de aumentos en la temperatura, las precipitaciones y la evaporación, lo que redundará en el cambio de las presiones de insectos, malezas y enfermedades (Mase 2014).

La zona de los trópicos, donde se practica agricultura de secano y donde cambios leves tienen una gran influencia en la productividad, son las áreas con mayor sensibilidad y que pueden verse mayormente afectadas por el calentamiento global y cambio climático, de acuerdo con Carazo *et al.* (2012).

2.3. Café como actor importante de la agricultura

La producción de café es uno de los sectores agrícolas de mayor importancia a nivel mundial. Solamente en Centroamérica se produce el 20% del café exportado mundialmente, en esta región el café representa 9% del valor de las exportaciones (IICA y CATIE, 2016).

Costa Rica, es un país en donde la producción de café representa una gran parte del sector agrícola y una significativa fuente de empleo y economía para un segmento de la población. De hecho, así lo muestra el Informe del Estado de la Nación (2017), donde se indica que para el 2016 el café se mantenía como el cultivo dominante en el país, con una extensión de 88 954 ha.

2.4. Tipos de procesamiento del café

El café, de acuerdo con Besora (2016), es un arbusto de hoja perenne de la familia de las Rubuáceas, el fruto tiene dos semillas o granos, elemento que es consumido tostado y molido en una bebida que se obtiene de la infusión de estos.

Colón (1996) y Adams (2006) mencionan que existen dos tipos de métodos para el procesamiento del café: Proceso seco y proceso húmedo, los cuales se describen a continuación:

2.4.1. Procesamiento seco: En este proceso, el fruto se deja en la planta hasta el final de la temporada, cuando todo haya madurado. Estos frutos se recogen y se secan al sol, luego se da la remoción de la pulpa mediante descascarillado mecánico. El residuo asociado con este proceso es la pulpa seca, que se puede utilizar como combustible por su alto contenido de celulosa. Este método es más simple y de menor impacto ambiental que el proceso húmedo;

sin embargo, su producto se considera de menor calidad que el procesado en húmedo y por lo tanto es de un precio más bajo. Además, funciona mejor con *C. robusta*, debido a que su pulpa fina permite el secado directo; sin embargo, esta variedad de café no se cultiva en el país.

En la Figura 1 se muestra el esquema del procesamiento del café por el método seco, descrito anteriormente.

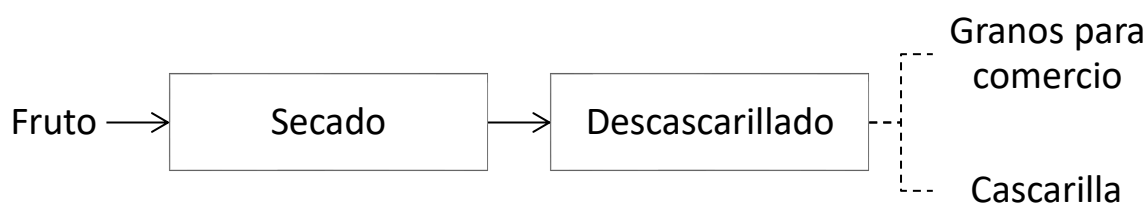


Figura 1. Esquema del procesamiento seco de café. Fuente: Elaborado con base en Colón 1996.

2.4.2. Procesamiento húmedo: Después de la cosecha, los granos de café se transportan al Beneficio y se introducen en una tolva, estos frutos son transportados por agua a la despulpadora. En este caso, el agua sirve para transportar el fruto y para eliminar granos dañados o sólidos que queden en la superficie. En el despulpador, se retira la cascarilla y la pulpa, las cuales se descartan como desecho y el resto pasa a un tanque de fermentación durante 12-48 horas, donde se digiere gracias a la acción microbiana y sus enzimas endógenas. En la limpieza, los granos y el pergamino que los cubre son enviados a secadores, mientras que el agua y el mucílago se descartan como aguas residuales.

Después del secado, el pergamino y la película plateada (que rodeaban el grano) son retirados mediante máquinas de descascarillado o mediante la agitación en un tamiz. El pergamino es descartado luego de su separación.

Es en las etapas de limpieza y el lavado de granos fermentados, de acuerdo con Cárdenas y Vásquez (2013), donde este procesamiento genera las mayores cantidades de aguas residuales contaminadas con alto contenido orgánico. Este es uno de los principales problemas sanitarios que acarrear los procesos productivos de café, que durante muchos años han afectado el ambiente, principalmente los cuerpos de agua donde son vertidas estas aguas residuales. De hecho, para el año 1993, el Gobierno de Costa Rica aceptó que el problema sanitario de esto era grave y declaró que 2/3 de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) de los ríos del país provenía en esa época de las aguas residuales de Beneficios de café (Adams 2006).

Según Adams (2006), existen alrededor de 50 tipos de especies de plantas de café, sin embargo, las más utilizadas a nivel mundial son: *Coffea arabica* y *Coffea robusta*. En Costa Rica el sector cafetalero trabaja mayoritariamente con la *C. arabica*, que es la más generalizada a nivel mundial y se produce casi en su totalidad bajo el método de procesamiento húmedo.

En la Figura 2 se muestran los pasos del procesamiento húmedo de café, descrito en los párrafos anteriores.

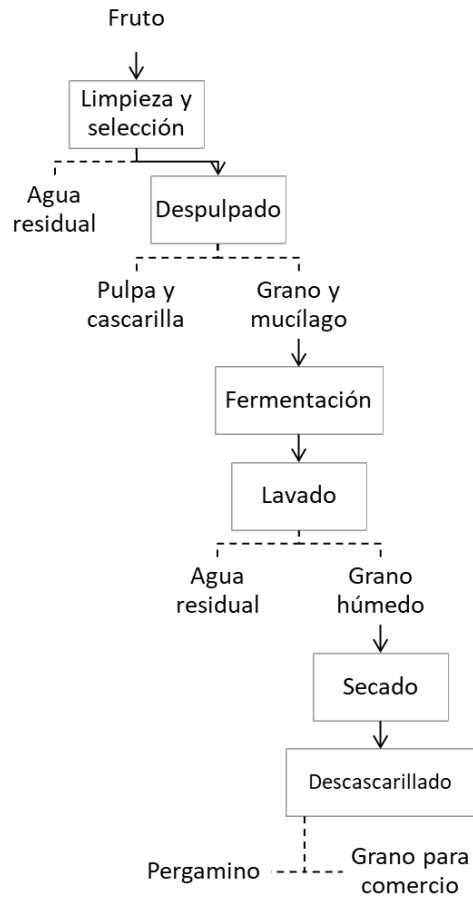


Figura 1. Esquema del procesamiento húmedo de café. Fuente: Elaborado con base en Colón 1996.

2.5. Problemas ambientales de la industria cafetalera

La producción cafetalera es generadora de diversos impactos sobre el ambiente, algunos de los cuales se mencionan a continuación.

La deforestación asociada a la siembra de la plantación de café contribuye a la pérdida de biodiversidad, la erosión y la degradación del suelo, según indica Osorio (2016), así como la contaminación de este o de cuerpos de agua cercanos, si se agregan agroquímicos para preparar el suelo.

Además, la utilización de plaguicidas y fertilizantes contribuye a la eutrofización de los cursos de agua, afectándola para consumo humano y el ecosistema acuático en general, así como organismos que dependen de este. Es importante mencionar también que estas sustancias se han relacionado con las altas tasas de cáncer, las intoxicaciones agudas, el desarrollo de plagas resistentes a productos químicos, y la evolución de las plagas secundarias cuando se dan problemas de infestaciones (Adams 2006).

Otro de los problemas ambientales, es causado por los Beneficios en el procesamiento húmedo, donde se generan grandes cantidades de aguas residuales. Estas aguas contienen altas cargas orgánicas, incluso con valores mayores a 10 g/L de demanda química de oxígeno (DQO), por lo que en caso de ser depositadas directamente a un cuerpo receptor o de una contaminación accidental, podría generarse el agotamiento del oxígeno disuelto, eutrofización e inclusive la contaminación de algún acuífero, de acuerdo con Cárdenas y Ortiz (2014).

Por esto la ingeniería sanitaria se ha ocupado de buscar soluciones para dar un tratamiento eficiente a estas aguas residuales y así evitar problemas graves de contaminación.

En la Figura 3 se presentan algunos de los principales impactos ambientales del proceso productivo del café, identificados por la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (2007):

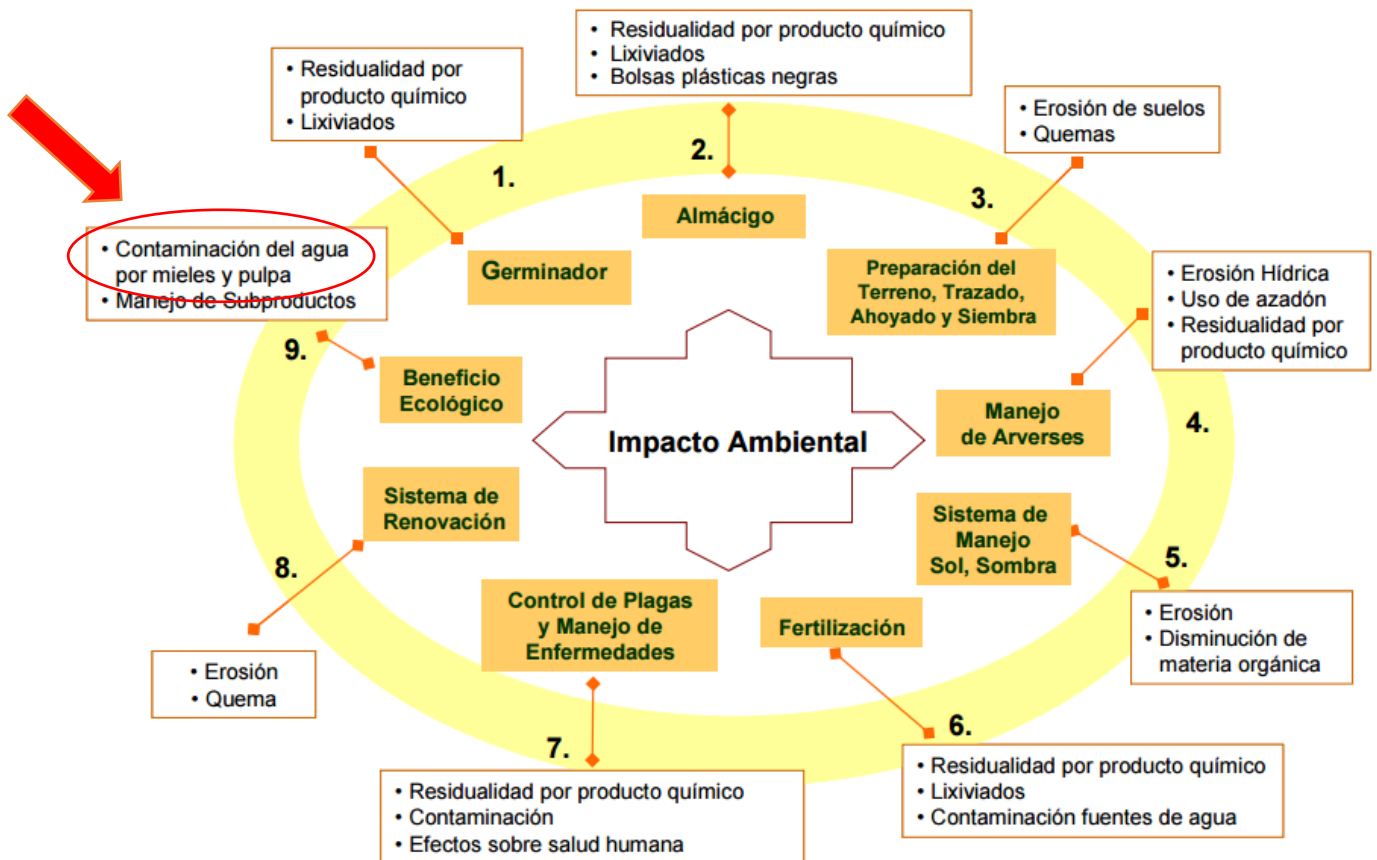


Figura 2. Principales impactos ambientales del proceso productivo del café.

Fuente: Tomado de Federación Nacional de Cafeteros de Colombia 2007.

Como se puede observar en la Figura 3, cada etapa del proceso productivo del café genera algún impacto directo o indirecto sobre el ambiente. En este caso, la investigación se centra en un problema que compete a la ingeniería sanitaria: el impacto de la contaminación del agua por mieles, enfocándose en la emisión de GEI generada por los diversos sistemas de tratamiento de estas aguas.

2.6. Tratamiento de las aguas residuales

Las aguas residuales pueden contener materiales como sedimentos, grasas, aceites, bacterias, patógenos, virus, sales, nutrientes de algas, pesticidas, compuestos orgánicos refractarios,

metales pesados, entre otros. El objetivo de un sistema de tratamiento es eliminar la mayor cantidad posible de estos materiales. Los tratamientos actuales de las aguas residuales se pueden dividir en tres niveles (Manahan 2000).

2.6.1. El tratamiento primario: Consiste en la eliminación de materia insoluble, como arenilla, grasa y sólidos gruesos del agua. El principal objetivo de esta etapa es eliminar o reducir el tamaño de los residuos y los sólidos grandes que ingresan a un sistema de tratamiento (Manahan 2000).

2.6.2. El tratamiento secundario: Es un tratamiento biológico para disminuir la materia orgánica biodegradable en aguas residuales conocida como la DBO, que es la demanda bioquímica de oxígeno (Manahan 2000).

2.6.3. El tratamiento terciario: Consiste en un tratamiento químico de residuos que no son eliminados en el tratamiento secundario, como lo son los sólidos en suspensión, los compuestos orgánicos disueltos y los materiales inorgánicos disueltos, incluidos los nutrientes para las algas (Manahan 2000).

2.7. Tratamiento de las aguas residuales de Beneficios de café

Uno de los principales problemas ambientales y sanitarios a los que se enfrentan los productores de café es el tratamiento de las aguas residuales generadas a partir del procesamiento de este.

Según Adams (2006), en América Central las lagunas, tanto aerobias como anaerobias, son el principal método para tratar las aguas residuales de los Beneficios de café; sin embargo, la

mayoría se encuentra en malas condiciones y son sitios que tienden a generar la proliferación de insectos (voladores principalmente).

Según Chacón (2015), en el país se utilizan distintos tipos de tratamiento para las aguas residuales de los Beneficios de café, mencionados y descritos a continuación:

2.7.1. Lagunas anaerobias: Las lagunas anaerobias son excavaciones generalmente profundas (5-10 m), en ellas se tratan las aguas residuales, donde en la totalidad de su profundidad no hay presencia de oxígeno. Este sistema posee tanto ventajas como desventajas, algunas de las cuales se mencionan en el siguiente cuadro (Korsak 2010):

Cuadro 1. Ventajas y desventajas de las lagunas anaerobias

| Ventajas | Desventajas |
|---|---|
| Bajo costo | Requiere grandes extensiones de terreno |
| Requiere mínima capacitación del personal | Efluente con gran cantidad de algas |
| La disposición de lodos se puede realizar cada 10 o 20 años | Al ser lagunas sin aireación a menudo no cumplen parámetros de calidad del efluente |
| Estabilidad frente a variaciones de caudal y carga contaminante | Pueden causar contaminación a aguas subterráneas por infiltración |
| | Puede causar malos olores |
| | Al ser sin oxígeno, emite altas concentraciones de CH ₄ |

Fuente: Tomado de Korsak 2010.

2.7.2 Lagunas aerobias: A diferencia de las anteriores, las lagunas aerobias tienen mucha menor profundidad (0,3 - 0,6 m), donde la fotosíntesis suministra el oxígeno necesario para mantener condiciones de aerobias en toda la columna de agua. En este sistema, al igual que el

anterior, el proceso de depuración se produce gracias a reacciones biológicas, químicas y físicas, que tienden a estabilizar el agua residual.

Se genera procesos como sedimentación, oxidación, fotosíntesis, aireación, entre otros. Al ser similar a la laguna anaerobia, sus ventajas y desventajas son similares, con la diferencia de que al ser un sistema con presencia de oxígeno, no se emiten altas cantidades de metano generado en el sistema anterior (Moreno, 2003).

2.7.3. Digestión anaerobia: La digestión anaerobia es un proceso biológico que se da en ausencia de oxígeno y donde gracias a la acción de bacterias específicas, la materia orgánica transforma en productos gaseosos (como metano, dióxido de carbono, hidrógeno, sulfuro de hidrógeno, entre otros), nutrientes y productos minerales (como nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y otros).

La digestión anaerobia produce altos porcentajes de CH_4 , por lo que se puede aprovechar para generar energía mediante combustión. Según IDAE (2007), el proceso controlado de digestión anaerobia es uno de los sistemas más adecuados para la reducción de emisiones de GEI, ya que al ser quemado el CH_4 , se deja de emitir a la atmósfera, para emitir CO_2 , que según el IMN (2017) es 21 veces menos dañino (en cuanto a su potencial de calentamiento global) que el metano.

Entre sus ventajas, en comparación con un sistema anaerobio en lagunaje, se puede mencionar: se da una reducción de olores, se pueden reducir las emisiones de GEI y se puede dar un aprovechamiento energético, ya que en la laguna se produce emisiones que no son controladas (IDAE 2002). Sin embargo, al ser un sistema de igual manera anaerobio, emite

más GEI que un sistema en presencia de oxígeno, lo cual puede llevar a generar más problemas ambientales si no se maneja adecuadamente.

En algunos casos la producción de energía no es factible debido a que la cantidad de gas generado no es suficiente para hacer trabajar un sistema.

2.7.4. Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (RAFA): Según Caicedo (2006), citado por Márquez y Martínez (2011), este es un sistema que consiste en un reactor con una biopelícula fija sin algún tipo de soporte, con una cámara de digestión que tiene flujo ascendente y a cierta altura, se desarrolla un manto de lodos anaerobios altamente activos, en donde se da la estabilización de la materia orgánica. Un esquema básico se muestra en la Figura 4.

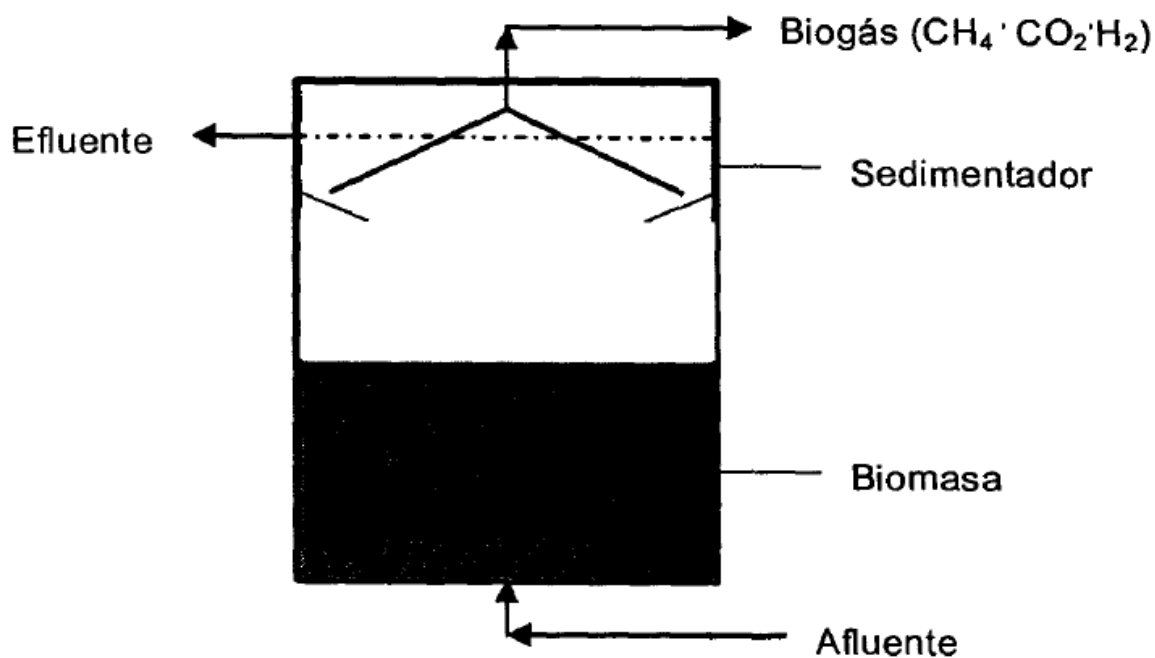


Figura 3. Diagrama de un reactor anaerobio de flujo ascendente.

Fuente: Tomado de Jaubert 2004.

A continuación, se presentan algunas ventajas y desventajas de este sistema según Márquez y Martínez (2011):

Cuadro 2. Ventajas y desventajas de los reactores anaerobios de flujo ascendente, en comparación con los sistemas aerobios convencionales.

| Ventajas | Desventajas |
|--|---|
| Menor costo de implantación y manutención | Arranque del proceso es lento |
| Consumo bajo de energía eléctrica | Las bacterias metanogénicas se inhiben con gran cantidad de compuestos |
| Filtros tienen buena eficiencia de remoción de materia orgánica | Aplicación debe monitorearse |
| Bajos requerimientos nutricionales | Puede requerir más depuración después de su efluente |
| Producción de CH ₄ aprovechable | Emite altas cantidades de metano a la atmósfera, si este no es utilizado |

Fuente: Tomado de Márquez y Martínez 2011

2.7.5. Tanque de oxidación: Este sistema es una modificación del tratamiento con lodos activados. Es un tanque en forma de herradura, dentro del cual se encuentran uno o múltiples canales, con aireadores montados en forma vertical u horizontal que proporcionan la circulación del agua y la transferencia de oxígeno. Entre sus ventajas se puede mencionar que permite la remoción de contaminantes con bajos requerimientos operacionales, así como con bajos costo de mantenimiento y operación. Como parte de sus desventajas están su efluente con altas concentraciones de sólidos suspendidos, en relación con otras modificaciones del proceso de lodos activados y que, además, requiere de una superficie de terreno extensa (EPA 1999).

2.7.6. Drenajes: Estos sistemas son considerados lechos de infiltración formados por zanjas y distribuidos en superficies amplias del terreno o más concentrados definidos por pozos de

infiltración, donde se introduce grava con tamaños de entre 7 y 10 cm que actúa como medio filtrante. Se llevan a cabo también fenómenos de biodegradación (dada la adherencia de microorganismos en las paredes del material filtrante) y de evapotranspiración por efecto de la radiación del sol y de las plantas que pudieran crecer en las inmediaciones (CFIA 2017).

2.7.7. Aspersión sobre pasto estrella: Modalidad de 'tratamiento *in situ*' que consiste en la aplicación de las aguas mieles de Beneficios de café para su tratamiento directo en sembradíos de pasto estrella (*Cynodon nelmfluensis*) (Chacón 2011).

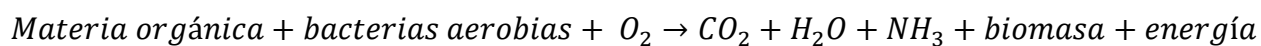
Este método busca evitar el vertido de aguas residuales, ya que el sembradío funciona como un lecho de secado. Este método cuenta con la aprobación del Ministerio de Salud desde el 2009 y con él se ha logrado una reducción del consumo de agua de 4.0 m³ a 0.5m³, por fanega procesada en algunos Beneficios (Chacón 2011).

2.8. Emisiones de GEI en los STAR

La emisión de CH₄, CO₂ y N₂O en los STAR se genera debido a la degradación biológica de la materia orgánica y los nutrientes que traen consigo las aguas que se tratan en el sistema. (Molina y Villatoro 2006). A continuación, se describe el proceso de emisión de GEI en los diferentes métodos de degradación de materia orgánica.

2.8.1 Degradación aerobia: Según Lasso Palacios (2010) en este proceso se desarrolla en tres procesos: a) Catabolismo, donde se da la oxidación de las macromoléculas que componen la materia orgánica, b) Anabolismo, donde se realiza la síntesis de compuestos orgánicos simples por parte de los microorganismos, c) Autólisis, donde se da la respiración endógena u autooxidación de las células microbianas.

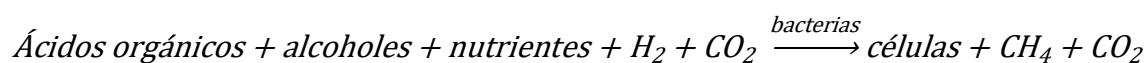
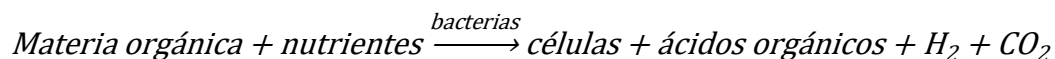
Las bacterias son los microorganismos predominantes en todo este proceso y el oxígeno es el aceptor final de electrones, como se resume en la siguiente reacción (Romero 2014):



2.8.2 Degradación anaerobia: Los procesos de degradación anaerobia de las aguas residuales se desarrollan en tres etapas (Lasso Palacios 2010):

- **Hidrólisis y acidogénesis:** en esta etapa los compuestos orgánicos complejos se transforman en compuestos más sencillos y solubles por la acción de las enzimas de bacterias fermentativas. Compuestos como los carbohidratos, lípidos y proteínas son transformados en azúcares, aminoácidos, ácidos grasos y glicerol que son fuente de energía y carbono para los microorganismos.
- **Acetogénesis:** los compuestos de la etapa anterior se transforman a través de una serie de reacciones fermentativas en acetato, H_2 y CO_2 , principalmente. Estas transformaciones se llevan a cabo por bacterias acetogénicas productoras de hidrógeno y bacterias acetogénicas consumidoras de hidrógeno.
- **Metanogénesis:** en esta última etapa, la transformación del acetato, CO_2 y H_2 se realiza por las bacterias metanogénicas reductoras de CO_2 y bacterias metanogénicas acetoclásticas. Los productos finales de la transformación son CH_4 y CO_2 .

Las ecuaciones globales del proceso anaerobio son (Romero 2014):



En los STAR el óxido nitroso es emitido durante el proceso de remoción biológica de los nutrientes. La remoción biológica de nitrógeno convencional ocurre con una nitrificación/desnitrificación (Kampschreur; Temmink; Kleerebezem 2009).

La nitrificación corresponde al proceso de oxidación del nitrógeno amoniacal (NH_4^+) a nitratos (NO_3^-) en presencia de oxígeno por medio de microorganismos heterotróficos y autotróficos (Wrage, citado por Correa 2016). Por su parte, la desnitrificación consiste en la reducción de nitratos (NO_3^-) a nitritos (NO_2^-) y luego a nitrógeno molecular (N_2) por microorganismos heterotróficos, los cuales requieren, para su buen desarrollo, bajas concentraciones de oxígeno y alta disponibilidad de materia orgánica biodegradable (Liikanen, citado por Correa 2016).

2.9 Acciones de mitigación en el sector cafetalero

Uno de los mecanismos trazados por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático para reducir las emisiones de GEI, son las Acciones de Mitigación Nacionalmente Apropriadas o NAMA, las cuales son un conglomerado de acciones y políticas que realizan los países como parte de sus compromisos en la temática, que incluyen la identificación y establecimiento de fuentes de financiamiento, métodos de evaluación y monitoreo (Estado de la Nación 2014).

En este sentido, el MAG, MINAE, Icafe y Fundecooperación, tomaron la decisión de implementar la primera NAMA en café en el mundo, para la cual se han establecido alianzas entre los sectores público, privado y académico, con el objetivo de crear innovaciones que mejoren la competitividad y la eficiencia del sector y reduzcan su impacto sobre el ambiente (Estado de la Nación 2014 e Icafe 2012)

Como parte de las medidas propuestas dentro de las NAMA café, se encuentran: la reducción del uso de fertilizantes nitrogenados, uso eficiente del agua y energía en el beneficiado y un programa de fomento de sistemas agroforestales (Icafe 2012).

2.9.1. Reducción de uso de fertilizantes nitrogenados: Debido a que todavía existen planes de fertilización ineficientes, donde se utiliza un exceso de fertilizantes y se generan mayores emisiones de GEI, se busca proponer el uso de fertilizantes de liberación controlada, adecuación de planes de fertilización e incorporación, dentro de las plantaciones, de especies de árboles fijadores de nitrógeno (Icafe 2012).

2.9.2. Uso eficiente del agua y energía en el beneficiado de café: Las medidas se enfocan en reducir el uso de agua en el procesamiento del café y generar, de manera eficiente, energía a partir de los subproductos. Como parte de esta propuesta, se analiza el cambio de algunas lagunas anaeróbicas, que se utilizan para el tratamiento de aguas residuales, a un sistema de riego a pasturas (específicamente pasto estrella), lo cual, en una aplicación en 46 Beneficios, con el potencial para implementarlas, se reducirían en, aproximadamente, 6 085 TM de CO₂e las emisiones (Icafe 2012).

2.9.3. Programa de fomento de sistemas agroforestales: Se promueve la incorporación de 70 árboles maderables, leguminosos o en peligro de extinción por cada hectárea de cafetal; con lo que se busca tener inclusive 34 TM de CO₂e por hectárea (Icafe 2012).

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1. Enfoque de la investigación

Esta investigación fue principalmente cuantitativa, ya que durante las diferentes etapas se tomaron como base datos numéricos para la obtención de los principales resultados. El estudio se realizó con información generada en las cosechas de café 2015-2016 y 2016-2017.

3.2. La población y la muestra

La población de esta investigación fue de 210 Beneficios de café inscritos en el Instituto del Café de Costa Rica, para el año 2015. Se trabajó con una muestra mínima de 20 Beneficios para el diagnóstico, ya que el tiempo y el presupuesto no permitían realizarlo para toda la población.

El tamaño de esta muestra se determinó mediante la siguiente fórmula, utilizada cuando se conoce el tamaño de la población. (Torres *et al.* 2006):

$$n = \frac{k^2 N p q}{e^2 (N-1) + k^2 p q} \quad (1)$$

Donde:

N : es cantidad total de Beneficios

k : es una constante que depende del nivel de confianza que se asigne

e : es el error muestral deseado

p : es la proporción de Beneficios que cuentan con sistemas anaerobios y de aspersión

q : es la proporción de Beneficios que no poseen sistemas anaerobios ni de aspersión

n : es el tamaño de muestra.

En este caso se utilizaron los siguientes valores:

Cuadro 3. Valores utilizados para la determinación del tamaño de la muestra de investigación.

| Dato | Símbolo | Valor |
|---------------------|----------------|--------------|
| Población | N | 210 |
| Nivel de confianza | k | 1,15 (75%) |
| Error muestral | e | 0,12 (12%) |
| Proporción positiva | p | 0,5 |
| Proporción negativa | q | 0,5 |
| Tamaño de muestra | n | 20 |

Aplicando la fórmula presentada, el tamaño mínimo de la muestra resultó de 20, utilizando un nivel de confianza de 75% y un error muestral de 12%. Se usaron estos valores debido a la limitante del tiempo para el desarrollo del proyecto y el factor económico, pues la aplicación en más Beneficios representaba un aumento significativo de los costos del proyecto, así como su extensión en el tiempo.

3.3. El tipo de muestreo

Muestreo estratégico por conveniencia, por medio del cual se logró garantizar, que en la muestra se tomaron en cuenta las principales variables que presentan los diferentes Beneficios en el país. Los factores considerados para elegir la muestra inicial fueron:

3.3.1. Zona geográfica del país: Costa Rica está dividido en ocho regiones cafetaleras, a saber: Valle Central, Valle Occidental, Guanacaste, Tres Ríos, Turrialba, Orosi, Brunca y Tarrazú.

3.3.2. Altitud de la zona: Los Beneficios seleccionados estaban presentes en las diferentes altitudes: Baja (500 – 1000 m.s.n.m.), Media (1000-1500 m.s.n.m.) y Alta (1500-1900 m.s.n.m.).

3.3.3. Tipo de Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales: Se seleccionaron de acuerdo con el tipo de STAR, especialmente los que trabajan en condiciones anaeróbicas, a saber: laguna anaerobia, reactor anaerobio, tanque de oxidación, drenaje y aspersión sobre pasto estrella.

3.3.4. Capacidad de procesamiento: Es la cantidad de fanegas de café que puede procesar un Beneficio por cosecha, la cual es muy diversa y puede variar de los micro Beneficios con aproximadamente 300 ff/cosecha a los Beneficios de gran tamaño, que procesan 250 000 ff/cosecha.

3.4. Sitios de estudio

En la Etapa I. Diagnóstico participaron 27 Beneficios pertenecientes a las ocho regiones cafetaleras del país, elegidos de acuerdo con los factores mencionados, los cuales se muestran en el Cuadro 4. En la Etapa II y III se trabajó con 9 Beneficios seleccionados a partir de la primera etapa, los cuales se muestran en el Cuadro 6.

Cuadro 4. Beneficios de café seleccionados para el diagnóstico del proyecto de investigación.

| Nombre | Ubicación | STAR | Altitud | Capacidad procesamiento* (ff/cosecha) |
|---------------------|--------------------------|------|---------|---------------------------------------|
| CoopeAtenas R.L. | Atenas | L | Media | 60000 |
| Cafetalera Quijano | Turrialba | L | Baja | 25000 |
| Río Jorco | San Ignacio, Acosta | L | Alta | 4500 |
| CooproSan Vito R.L. | San Vito Coto Brus | L | Baja | 80000 |
| Río Negro | Sabalito, Coto Brus | L | Baja | 36000 |
| Santa Rosa Ltda. | Santa Rosa, Turrialba | L | Baja | 45000 |
| La Violeta | Frailles de Desamparados | L | Alta | 2300 |

| Nombre | Ubicación | STAR | Altitud | Capacidad procesamiento* (ff/cosecha) |
|--|--------------------------|-------------|----------------|--|
| Café de Altura San Ramón Especial S.A. | San Ramón | L | Media | 10000 |
| Beneficio La Guaria | San Pedro de Poás | AE | Media | 20000 |
| CoopeAgri R.L. | Pérez Zeledón | L | Baja | 240000 |
| CoopeTarrazú R.L. | San Marcos Tarrazú | AE | Alta | 265000 |
| Agrícola El Cántaro | Palmares | L+AE | Media | 15000 |
| PAGUA | Pérez Zeledón | AE | Baja | 600 |
| Beneficio Las Marías S.A. | Santa Bárbara de Heredia | AE | Media | 20000 |
| San Jerónimo | San Pedro, Pérez Zeledón | AE | Baja | 1600 |
| Hermanos Vargas Hidalgo | Poás, Alajuela | AE | Media | 4500 |
| Microbeneficio Vista del lago | San Carlos Tarrazú | D | Alta | 600 |
| Microbeneficio La Casona | San Marcos Tarrazú | D | Alta | 500 |
| La Bandera | San Lorenzo Tarrazú | TO | Alta | 400 |
| Monte Copey | Copey, Dota | D | Alta | 700 |
| Juanachute | San Pablo, León Cortés | D | Alta | 400 |
| La Eva S.A. | Sarchí | RA | Media | 70000 |
| Café Cristina | Paraíso | RA | Baja | 1000 |
| Coopelibertad R.L. | Moravia | RA | Media | 76000 |
| CooproNaranjo R.L. | Naranjo | RA | Media | 110000 |
| Coope Cerro Azul R.L. | Nandayure | L | Baja | 5000 |
| Coope Pilangosta R.L. | Hojancha | L | Baja | 4000 |

Fuente: Elaborado con base en Icafe 2015. Simbología: L: laguna anaerobia, L+AE: laguna anaerobia + aspersión sobre pasto estrella, TO: tanque de oxidación, D: drenaje, RA: reactor anaerobio y AE: aspersión sobre pasto estrella. * Datos aproximados.

Como se observa en el Cuadro 4, la muestra está conformada por diversos tipos de sistemas según la información aportada por el Icafe. Los distintos sistemas se clasificaron con la siguiente distribución: 40,7% de sistemas de lagunas anaerobias, 3,7% de laguna con aspersión, 3,7% de tanques de oxidación, 14,8% sistemas de drenajes, 14,8% sistemas con reactores anaerobios y 22,2% de aspersión sobre pasto estrella. Estos Beneficios representan aproximadamente el 64% de la producción total de café en el país y están distribuidos en las diferentes regiones cafetaleras del país, como se puede notar en la Figura 5.

BENEFICIOS DIAGNOSTICADOS PARA PROYECTO NAMA CAFÉ AGUAS RESIDUALES, EN EL AÑO 2015

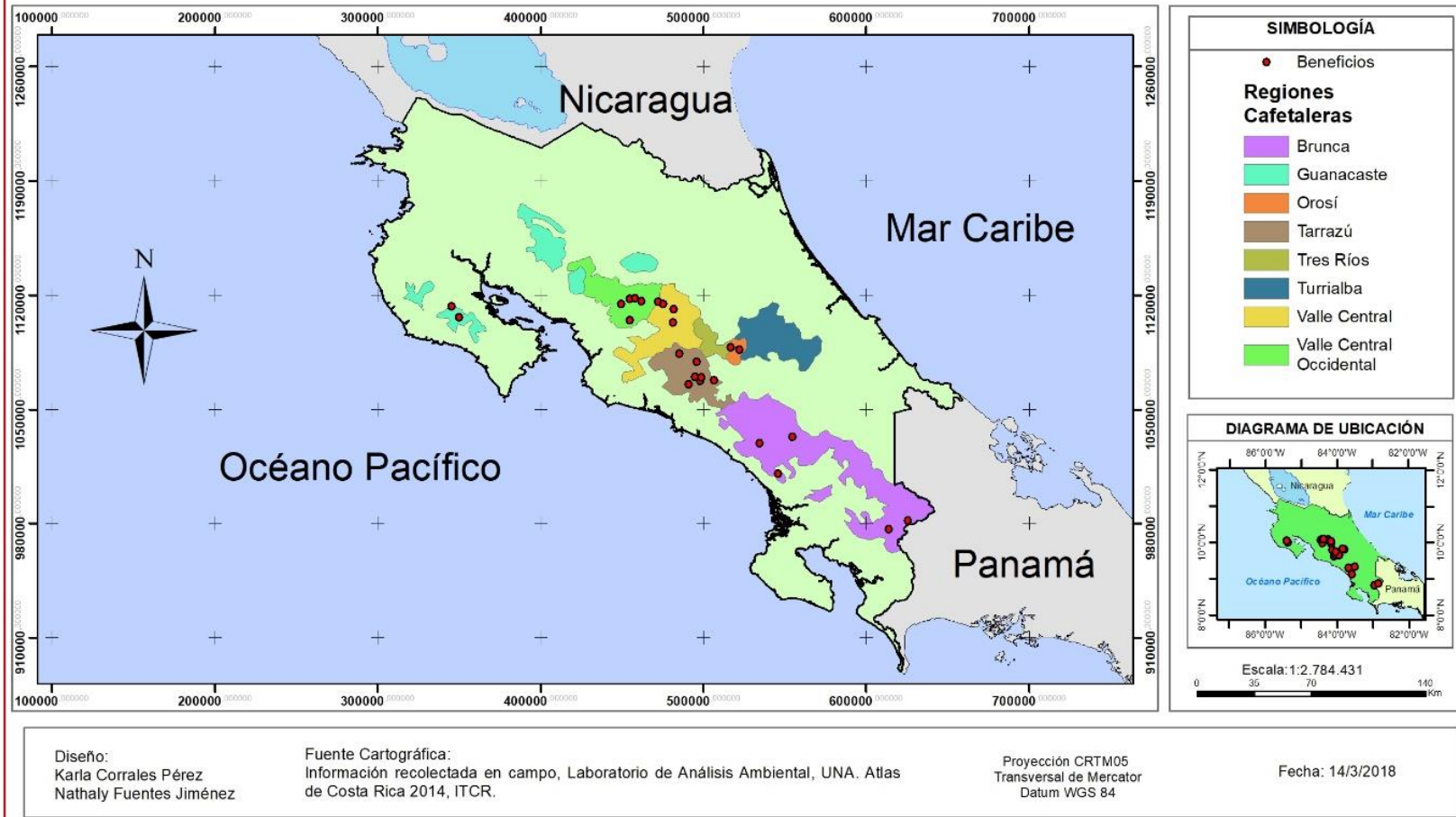


Figura 4. Ubicación de los 27 Beneficios diagnosticados.

3.5. Instrumentos y técnicas

Se utilizaron diversos instrumentos y técnicas a lo largo del procedimiento, que ayudaron a la elaboración de la investigación y a la búsqueda de resultados exactos y precisos, los cuales se muestran en el siguiente cuadro:

Cuadro 5. Herramientas utilizadas para realización del proyecto de investigación.

| Etapa del estudio | Herramienta | Tipo de herramienta | | |
|-----------------------------|---|---------------------|-------------|--------|
| | | Técnica | Instrumento | Equipo |
| I. Diagnóstico | Encuesta sobre las características más importantes de los STAR convencionales y Aspersión sobre pasto estrella. | | X | |
| II. Mediciones de GEI | Técnica de Cámara Estática de Flujos, para la medición de la emisión de GEI. | X | | |
| | Cámara estática de flujo. | | | X |
| | Analizador de gases de combustión. Marca Testo. Modelo 350 ES. | | | X |
| | Tubo Pitot tipo L o estándar. | | | X |
| | Analizador infrarrojo de CO ₂ . Marca EXTECH. Modelo CO250. | | | X |
| | Cromatógrafo de gases. Marca Agilent. Modelo 7890. Con detectores de captura de electrones (ECD) y de ionización de llama (FID). | | | X |
| III. Análisis de Viabilidad | Cuestionario sobre datos técnicos, económicos y ambientales de los STAR. | | X | |

3.6. Procedimiento metodológico

El proyecto se realizó en tres etapas, correspondientes a cada objetivo específico planteado.

3.6.1. Etapa I. Diagnóstico

Se realizó el diagnóstico de los diferentes sistemas de tratamiento de aguas residuales que utilizan los 27 Beneficios seleccionados, para conocer sus características y estado actual, siguiendo los pasos descritos a continuación:

- a) Se elaboró un cuestionario sobre las características y el estado actual de los STAR de los Beneficios que formaron parte de la muestra, el cual se muestra en el Apéndice 1.
- b) Se realizaron once giras con la colaboración de la Unidad de Industrialización del Icafe, en las que se realizó el diagnóstico de 27 Beneficios.
- c) El cuestionario fue completado por los encargados de los STAR, su objetivo fue obtener información como: STAR utilizado, capacidad de trabajo del sistema, período de cosecha, utilización actual, eficiencia de diseño y actual, resultados de reportes operacionales, altitud de la zona, capacidad de procesamiento de café, área superficial del STAR, tipo de vertido, entre otros.
- d) Se determinaron las características de los STAR pertenecientes a estos Beneficios de café y acorde con los resultados del diagnóstico, se estableció cuáles sistemas contaban con las condiciones para realizar mediciones de GEI, mediante la técnica de cámara estática de flujos.

3.6.2. Etapa II. Medición de generación de gases de efecto invernadero

A partir de la Etapa I se seleccionaron nueve Beneficios para la medición de emisiones de GEI. Se cuantificó el flujo de emisión de metano, dióxido de carbono y óxido nitroso en los STAR de estos Beneficios, mediante el cumplimiento de los siguientes pasos:

- a) Se realizó la selección de nueve Beneficios que formaron parte de la muestra para cuantificación de flujos de emisión. Esta escogencia se definió tomando en cuenta las siguientes variables: capacidad de procesamiento, facilidad de transporte, logística, infraestructura del STAR y características adecuadas para permitir la toma de la muestra en el sistema, así como las recomendaciones aportadas por el Icafe y el Laboratorio de Análisis Ambiental (LAA).
- b) Estos nueve Beneficios seleccionados representan alrededor del 5% de los afiliados al Icafe, y el 60% de la producción nacional de café. La elección de dicho tamaño de muestra se basó principalmente en las condiciones requeridas para los muestreos, además de la disponibilidad del recurso humano para efectuar los trabajos de campo, de infraestructura y de equipamiento del LAA.
- c) Se midieron los flujos de emisión de metano, óxido nitroso y dióxido de carbono, en las distintas unidades de los STAR, según se muestra en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Cantidad de muestras y análisis realizados para cada unidad de los STAR de los Beneficios.

| Beneficio | Unidades de emisión muestreadas | Número de muestras | Análisis realizados CH₄-CO₂-N₂O | Total de análisis realizados* |
|---|--|---------------------------|---|--------------------------------------|
| Santa Rosa Ltda. | Lagunas 1 y 2 | 48 | 576 | 9048 |
| CoopeAgri R.L. | Lagunas 1 y 8, Campo Aspersión | 168 | 2016 | |
| CoopeAtenas R.L. | Sedimentadores, tanque igualador, laguna oxidación, lecho de lodos | 148 | 1776 | |
| Café de Altura de San Ramón Especial S.A. | Tanque temporal, sedimentador, laguna oxidación, campo aspersión | 66 | 792 | |
| CooproNaranjo R.L. | Sedimentador secundario, reactor, laguna de oxidación | 93 | 1116 | |
| La Eva S.A. | Lecho de lodos, sedimentadores, tanque igualador, reactor | 87 | 1044 | |
| Hnos. Vargas Hidalgo S.A. | Campo de aspersión | 48 | 576 | |
| Las Marías S.A. | Campo de aspersión | 48 | 576 | |
| CoopeTarrazú R.L. | Campo de aspersión | 48 | 576 | |

* Dato sin contabilizar las diluciones cuando las muestras presentaron concentraciones por fuera del ámbito lineal del método.

- d) Las mediciones se elaboraron durante la temporada de beneficiado de café, que varía según las condiciones geográficas, climáticas y de altitud de la zona.
- e) Las mediciones se realizaron en al menos dos ocasiones durante la época de Beneficiado de café. Se ideó que fueran llevadas a cabo a inicio de la temporada

(justo antes de que se dieran las primeras descargas de agua residual a los sistemas de tratamiento), durante el “pico” de cosecha (producción máxima) y al finalizar la temporada de Beneficiado. Sin embargo, en los Beneficios en los que el sistema se mantiene vacío durante la época fuera de cosecha, las mediciones correspondientes a la temporada de inicio se realizaron hasta que el nivel del agua permitiera la navegación (aproximadamente un metro de profundidad).

- f) El número de puntos de muestreo se estableció en función del área del espejo de agua de cada una de las unidades del sistema de tratamiento, usando como referencia la tabla del Anexo 1. En los Apéndices 7 y 23 se pueden observar ejemplos de un diagrama de flujo del sistema de lagunaje y reactor anaerobio respectivamente.
- g) El muestreo en los sistemas con campo de aspersión sobre pasto estrella, se realizó por medio de una cuadrícula sobrepuesta sobre una parcela con un área de 600 m² (área que corresponde al campo de aspersión de menor tamaño, de los Beneficios en estudio), con el fin de asegurar la representatividad para todas las unidades de aspersión seleccionadas, estableciéndose un total de ocho puntos de muestreo para cada uno de estos sistemas. En el Apéndice 35 se puede observar un ejemplo de un diagrama de flujo de un sistema de tratamiento por aspersión sobre pasto estrella.
- h) Los puntos de muestreo se distribuyeron en la medida de lo posible, de manera equidistante, de tal forma que se abarcara el mayor número de zonas de emisión de acuerdo con la cantidad de puntos para dicha unidad. Los casos donde se necesitó realizar una distribución diferente, se ubicó los puntos de medición en las zonas donde se presentará mayor burbujeo, o bien, donde se representarán las diferentes características de la unidad del sistema.

- i) Las mediciones se efectuaron en dos condiciones de temperatura: baja y alta, de acuerdo con las características específicas de cada una de las zonas de estudio. Para ello se estableció que: (1) los muestreos a temperaturas bajas se ejecutaran en horario matutino, preferiblemente antes de las 08:00 am, o en horario vespertino, preferiblemente después de las 04:30 pm. (2) los muestreos a temperaturas altas se ejecutarán en horario de mayor incidencia de radiación, preferiblemente entre las 10:00 am y las 03:00 pm. Lo anterior considerando que la variación de temperatura podría afectar el flujo de generación de gases.
- j) Se tomaron muestras de agua de las principales unidades de tratamiento de algunos sistemas, con el propósito de analizar correlación entre las características del agua y los flujos de emisión de gases. Específicamente se analizaron 26 muestras, las variables medidas fueron DQO y sólidos volátiles, esta última directamente relacionada con la cantidad de biomasa presente en el agua por tratar. Las muestras tomadas fueron principalmente de agua cruda (antes de ingresar al sistema de tratamiento) y en las lagunas anaerobias (un metro después del ingreso a la laguna y un metro antes de la salida).
- k) Se midieron las emisiones generadas por la disposición o tratamiento de lodos provenientes de los STAR. Algunas de estas mediciones se realizaron al final de la cosecha (o posterior a esta) debido a que es en ese momento cuando los Beneficios, generalmente, disponen el material en el sistema de tratamiento. La frecuencia de medición se realizó en función del período de permanencia de los lodos en el sistema de tratamiento, sin embargo; las mediciones se realizaron de manera similar a los STAR. En los lechos de lodos, el período de generación de GEI se encuentra

desfasado respecto al ciclo de producción (Beneficiado), debido a que dichos residuos se disponen en el sistema de tratamiento hasta el final de la cosecha.

- l) Se midieron los flujos de emisión en cada uno de los sistemas seleccionados, según el procedimiento de métodos de análisis del LAA que permite la determinación de los flujos de emisión de metano y óxido nitroso aplicable para distintas fuentes de emisión, el cual se encuentra acreditado ante el Ente Costarricense de Acreditación (ECA) bajo la Norma INTE-ISO/IEC-17025:2005. El laboratorio posee también una metodología para la determinación de los flujos de dióxido de carbono. Basados en estas metodologías se midieron los flujos de emisión en cada uno de los sistemas seleccionados.

- m) Para la toma de las muestras se implementó el uso de campanas de homogenización o cámaras estáticas de flujos. Estas se construyeron usando cilindro de polietileno de alta densidad (HDPE) opaco con un diámetro medio de 36 cm y una altura efectiva de 50 cm y alrededor un tubo de cloruro de polivinilo (PVC) de 4 pulgadas, que le da la capacidad de flotar. Cada cámara se equipó con un ventilador accionado por una batería seca ubicada en la parte superior de la cámara, para asegurar una mezcla adecuada del aire dentro de esta, y un pequeño puerto de muestreo lateral para tomar las muestras. En la Figura 6 se presenta un diagrama de las campanas de muestreo utilizadas.

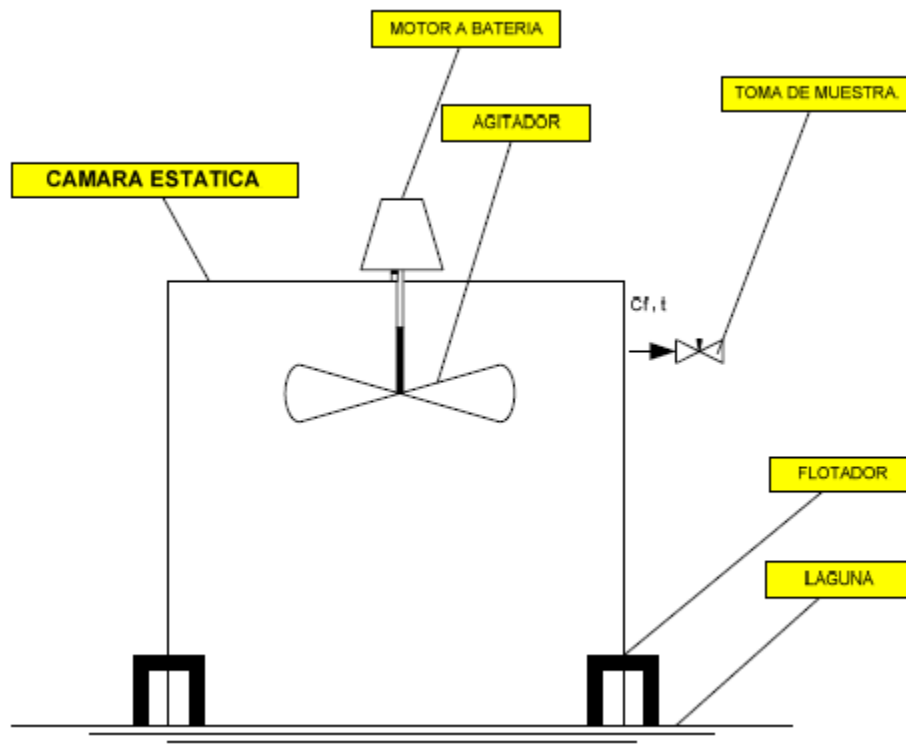


Figura 5 . Representación esquemática de la campana para la captura de los gases.

Fuente: Tomado de Parra *et al.* 2010.

- n) En los sistemas de lagunaje y reactor anaerobio, estas campanas fueron colocadas sobre el espejo de agua, y cuando fue necesario, se aseguraron por medio de un sistema de anclaje. En el caso de los sistemas de aspersión, la base de las cámaras (sin el flotador) fue enterrada, habiendo despejado previamente el material vegetal.
- o) En las campanas, el flujo de gas es capturado en un período de tiempo determinado, se suelen sugerir períodos no mayores a una hora para evitar la formación de microclimas que puedan alterar la estabilidad de la muestra dentro de la cámara (Wu *et al.* 2009).
- p) Para cada muestra se tomaron cuatro submuestras del aire acumulado dentro de la cámara, para el análisis de metano, dióxido de carbono y óxido nítrico, en períodos

de tiempo equivalentes, empezando en el tiempo cero y finalizando entre 30 – 60 minutos después de haberse iniciado el muestreo.

- q) Las muestras fueron tomadas con una jeringa de plástico de 10 ml y se inyectaron en tubos de vidrio al vacío del mismo volumen y de manera independiente, fueron debidamente identificadas y trasladadas al Laboratorio, para su posterior análisis por Cromatografía de gases de alta resolución.
- r) Para los análisis de metano y óxido nítrico, en cualquiera de los sistemas descritos, se utilizó un cromatógrafo de gases marca Agilent, modelo 7890A, el cual cuenta con un detector de ionización de llama (FID) para el análisis de metano y con un micro-detector de captura electrónica (μ ECD) para el análisis de óxido nítrico. El sistema se operó bajo las condiciones cromatográficas que se detallan en el siguiente cuadro:

Cuadro 7. Descripción de las condiciones cromatográficas que se utilizaron para la determinación de la concentración de metano y óxido nítrico.

| Condición | Metano | Óxido nítrico |
|--|----------------------|----------------------|
| Temperatura del puerto de inyección (°C) | 200 | 200 |
| Columna capilar | Agilent HP-PLOTQ | Agilent HP-PLOTQ |
| Temperatura del horno (°C) | 35 | 35 |
| Detector | FID | μ ECD |
| Temperatura del detector (°C) | 300 | 250 |
| Flujo de gas de arrastre (ml/min) | 12 (N ₂) | 6 (He) |

Fuente: Tomado de LAA 2015.

- s) Para la cuantificación de la muestra se preparó una curva de calibración con al menos cinco patrones de un cilindro de estándar gaseoso certificado (marca Scott), cuyo coeficiente de correlación debió ser mayor a 0,995. Se inyectó una muestra de

concentración conocida, que estuviera dentro del ámbito lineal de la curva, como mecanismo de control de calidad.

- t) Una vez analizadas las muestras se procedió con la determinación de la concentración del gas en la muestra en $\mu\text{mol/mol}$ (ppm_v), interpolando directamente en la curva de calibración ajustada linealmente por mínimos cuadrados simples.
- u) El análisis de dióxido de carbono se realizó mediante un analizador infrarrojo de CO_2 marca EXTECH, modelo CO250, modificado para inyectar directamente la muestra en la celda de detección, el cual arroja la concentración del gas en cada submuestra (ppm).
- v) Para los tres gases se construyó una gráfica de dispersión de concentración del gas en $\mu\text{mol/mol}$ vs. tiempo (en minutos), por cada una de las muestras, y se aplicó una regresión lineal a los puntos para obtener el valor de la pendiente. Por último, se calculó la emisión a partir de la siguiente ecuación (LAA 2015):

$$F_{\text{Emisión}} = \left[\frac{\left(m \times \frac{P \times M}{R \times T} \right) \times V_{\text{Cámara}}}{A_{\text{Cámara}}} \right] \times 1,44 \quad (2)$$

Donde:

$F_{\text{emisión}}$ = Flujo de emisión de área de la fuente ($\text{mg}/(\text{m}^2 \times \text{día})$).

m = pendiente de la regresión lineal ($\mu\text{mol/mol}/\text{min}$).

P = Presión ambiente (Pa).

M = Masa Molar del gas. $\text{MN}_2\text{O} = 44,0128 \text{ g/mol}$ y $\text{MCH}_4 = 16,04246 \text{ g/mol}$.

R = constante de los gases ideales, $8,314 \text{ Pa m}^3/\text{mol K}$.

T = Temperatura ambiente (K).

$V_{\text{Cámara}}$ = Volumen de la cámara (m^3).

$A_{\text{Cámara}}$ = Área superficial de la cámara (m^2)

1,44 = constante para conversión de unidades

- w) Para los sistemas de tratamiento que involucraron reactores anaerobios con recuperación del biogás generado, además de medir los flujos de emisión de GEI en el espejo de agua de las diferentes unidades del sistema y alrededor del reactor, también se determinó la tasa de emisión del biogás recuperado.
- x) Para esto último se realizó una perforación en la tubería que acarrea el gas, y en este punto se colocó un “septum” para poder tomar una muestra de gas con jeringa en un tubo de 10 ml al vacío. Las muestras recolectadas fueron debidamente identificadas y trasladadas al laboratorio para el análisis por cromatografía de gases.
- y) Posterior al muestreo de gas se utilizó un tubo de pitot tipo “L” con un manómetro diferencial para medir la velocidad de los gases que circulan por el ducto. Una vez obtenida la velocidad, junto con el área transversal del ducto, se utilizaron para calcular el caudal volumétrico.
- z) La ubicación de este puerto de muestreo debió cumplir con condiciones aceptables de flujo laminar, para lo cual se utilizó el método 1 y 2 de la USEPA para emisiones en fuentes fijas. Con los datos obtenidos se procedió a calcular el flujo de emisión utilizando la siguiente ecuación:

$$F_{Emisión} = C_{GEI} \times A \times v \times N \times F \times 1000 \quad (3)$$

Donde:

$F_{Emisión}$ = Flujo de emisión del GEI (g/día).

C_{GEI} = Concentración de GEI de interés en el ducto (mg/Nm³).

A = Área transversal del ducto (m²).

v = Velocidad de los gases dentro del ducto (m/h).

N = Factor de normalización del volumen por presión y temperatura.

F = Factor de ajuste temporal por el número de horas de operación del sistema de biogás por día.

aa) Finalmente, este flujo se expresa en términos de dióxido de carbono de acuerdo con el aprovechamiento que se haga del biogás generado (equivalente que es combustionado).

bb) Se determinó factor de emisión del STAR de cada Beneficio mediante un manejo estadístico de los datos, agrupándolos según los períodos de medición en cada uno, de tal manera que se obtuvieran los flujos de emisión ($\text{mg}/\text{m}^2\text{día}$), a partir de los cuales se crearon promedios ponderados en función de las áreas superficiales de emisión, de cada una de las unidades que componen los distintos sistemas de tratamiento.

cc) Posteriormente se procedió con el cálculo del factor, el cual se obtuvo del resultado del producto de las áreas de emisión, los períodos de emisión (según cada unidad evaluada en cosecha y poscosecha) y el cociente de las fanegas procesadas por cosecha, mediante la siguiente ecuación:

$$FE = \frac{f \times A \times t}{10^6 \times k} \quad (4)$$

Donde:

FE = Factor de emisión (kg/ff)

f = flujo de emisión ($\text{mg}/\text{m}^2\text{día}$)

A = área de emisión (m^2)

t = período de emisión (días)

k = fanegas procesadas por cosecha (ff)

De esta forma se obtuvo los kg de CH₄, CO₂ y N₂O emitidos por fanega procesada por cada STAR de los Beneficios participantes.

dd) Finalmente se determinó la emisión en kg CO₂e/ff, multiplicando los kg/ff por los PCG establecidos por el IMN (2017).

3.6.3. Etapa III. Análisis de la viabilidad técnica, económica y ambiental de los STAR.

Se analizaron y compararon diferentes características técnicas, económicas y ambientales de cada uno de los tipos de sistemas de tratamiento de aguas residuales evaluados en las etapas anteriores, con el fin de determinar la viabilidad de una reconversión de los sistemas tradicionales al método de aspersión sobre pasto estrella.

Para esto, esta etapa se dividió en tres secciones, cada una correspondiente a un tipo de viabilidad, de la siguiente manera:

- Fase I. Viabilidad Técnica
- Fase II. Viabilidad Económica
- Fase III. Viabilidad Ambiental

Para la realización de cada una de las fases, se tomaron en cuenta diversas variables, las cuales son presentadas en el Cuadro 8.

Cuadro 8. Variables estudiadas para el análisis de viabilidad técnica, económica y ambiental de los sistemas de tratamiento de agua residual de Beneficios de café

| Fases | Variables Relevantes | Descripción |
|----------------------------------|----------------------|---|
| Fase I. Viabilidad Técnica | Área requerida | Metros cuadrados necesarios para la implementación del STAR. |
| | Nivel de tratamiento | Nivel (primario, secundario o terciario) al que depura el STAR. |

| Fases | Variables Relevantes | Descripción |
|-----------------------------------|--|--|
| | Capacidad de tratamiento | Carga orgánica que el STAR es capaz de tratar. |
| | Eficiencia de remoción | Qué tan depurado es el efluente, de acuerdo con la calidad del afluente. |
| | Manejo de lodos | Necesidad del STAR de que los lodos sean retirados frecuentemente. |
| | Flexibilidad al cambio de características del afluente | Nivel en que el STAR puede soportar cambios en las características del afluente. |
| | Replicabilidad | Facilidad para replicar el STAR. |
| | Cumplimiento de legislación y normas | Nivel de cumplimiento del STAR con el RVRAR. |
| | Personal requerido | Cantidad de personal que se necesita para operar el STAR. |
| | Capacitación del personal | Duración de la capacitación para operar el STAR. |
| | Tiempo de retención hidráulica | Tiempo de permanencia del agua dentro del STAR. |
| | Mantenimiento de las características deseadas | Facilidad para mantener el STAR con las condiciones fisicoquímicas que necesita. |
| | Traslado de las aguas | Facilidad para llevar el agua residual del Beneficio hasta el STAR. |
| | Fase II. Viabilidad económica | Costo de construcción e implementación |
| Costo por consumo energético | | Cantidad de dinero por concepto de consumo de energía eléctrica. |
| Costo pretratamiento de las aguas | | Cantidad de dinero por pretratamiento de las aguas. |
| Costo asociado al personal | | Salario del operario del STAR. |
| Costo de mantenimiento | | Cantidad de dinero por concepto de mantenimiento del STAR. |
| Fase III. Viabilidad Ambiental | Beneficios económicos de la implementación | Si el uso del STAR conlleva algún beneficio económico. |
| | Ahorro de combustibles fósiles | Si el STAR conlleva un ahorro en el uso de combustibles fósiles. |
| | Posibles impactos ambientales | Si el uso del STAR puede llevar a impactos ambientales. |
| | Atracción de vectores de enfermedades | Si es común que el STAR atraiga vectores de enfermedades. |
| | Eficiencia en el uso del recurso hídrico | Si el uso del STAR representa una reducción en el uso del agua. |
| | Entorno ecológico | Si en los alrededores del STAR se observa flora y |

| Fases | Variables Relevantes | Descripción |
|-------|--------------------------|--|
| | | fauna diversa. |
| | Emisión de GEI al aire | Cantidad de emisiones de GEI por parte del STAR. |
| | Efluente del tratamiento | Si el STAR genera o no un efluente. |

Fuente: Elaborado con base en Cañadas 2014 y Manrique *et al.* 2002.

Esta etapa se realizó mediante la aplicación de una herramienta basada en la matriz de Evaluación de Alternativas y Tecnologías y la de Comparación de Costos de Tecnologías, ambas pertenecientes al Manual de Transferencias y Adquisición de Tecnologías Sostenibles (CEGESTI 2005), la cual fue adaptada para la utilización en este caso.

Cada una de las secciones se ejecutó mediante los siguientes pasos:

- a) Se determinó la importancia de cada variable mediante la ponderación del grado de relevancia en una escala cualitativa, denominándose en esta investigación como “Factor de Importancia”, y fue obtenido mediante la opinión de diferentes personas relacionadas con el ámbito del café, seis encargados de STAR pertenecientes a diferentes Beneficios, con sistemas diferentes, a quienes se les mencionaron las características y se les solicitó la asignación de una puntuación de uno a tres, de acuerdo con lo que consideraran que contaba con mayor peso a la hora de tomar la decisión de implementar un sistema de tratamiento de aguas residuales, siendo 1: poco importante, 2: de importancia media y 3: muy importante.
- b) Producto de las distintas opiniones, se cuantificó el promedio del valor numérico (\bar{x}) de la escala cualitativa de importancia (1, 2 o 3); luego se realizó la sumatoria de todos los promedios de las distintas variables ($\sum \bar{x}$) y se calculó un porcentaje de importancia para cada variable específica, dividiendo el promedio de cada variable entre la sumatoria de los promedios multiplicado por 100. Este porcentaje se

estableció como el “Factor de Importancia” (FI_x) utilizado en los análisis de viabilidad.

$$\text{Factor de importancia } (FI_x) = \frac{\text{Promedio de la variable } (\bar{x})}{\text{Sumatoria de todas las variables } \Sigma \bar{x}} \times 100 \quad (5)$$

- c) En las variables que fueron calificadas de forma unánime como “muy importante” por todos los expertos, se le sumó 10 puntos al valor del FI_x con el objetivo de aumentar el peso a la variable considerada de mayor importancia.
- d) Para la evaluación de viabilidad, una vez obtenidos los FI_x se procedió a evaluar cada una las variables del Cuadro 8 en la herramienta presentada en el Apéndice 45, para cada sistema de tratamiento (reactor anaerobio, laguna anaerobia y campo de aspersión sobre pasto estrella).
- e) La valoración se llevó a cabo mediante la información obtenida del cuestionario sobre datos técnicos, económicos y ambientales de los STAR de los Beneficios, los datos del diagnóstico, observaciones durante el trabajo de campo y datos técnicos. Se valoriza mediante una escala de 1, 2 o 3, siendo 1 la puntuación menor y 3 la mayor, para así obtener el “puntaje de variable” (PV). En el Cuadro 9 se puede observar el método de análisis para la puntuación de cada variable.

Cuadro 9. Método de análisis para la puntuación de las variables de la viabilidad técnica, económica y ambiental de los STAR evaluados

| Tipo de Viabilidad | Variables relevantes | Método de Análisis de Variable |
|--------------------|--------------------------|---|
| Viabilidad Técnica | Área requerida | Se elaboró un coeficiente entre el área superficial de los STAR de cada Beneficio y la cantidad de café que procesan por cosecha (m^2/ff cosecha). Se le asignó mayor puntuación al tipo de sistema cuyo promedio de coeficientes fue menor, lo cual significa que en menos superficie de terreno, tratan mayor cantidad de agua residual. |
| | Capacidad de tratamiento | <p>Se estimó en cantidad de agua tratada por área superficial de tratamiento (m^3/m^2). Se determinó de diferentes maneras según la información recopilada:</p> <p>Caso 1: Cuando la información recopilada fue fanegas de café tratado por hectárea (ff/ha) y consumo de agua por fanega (m^3/ff), se dividieron estos datos entre sí y se dividieron por el área superficial del sistema (m^2).</p> <p>Caso 2: Cuando la información recopilada fue la capacidad volumétrica del STAR (m^3), esta se dividió entre el área superficial de tratamiento (m^2).</p> <p>Caso 3: Cuando la información recopilada fue la capacidad de agua tratada por día ($m^3/día$) y el tiempo de retención hidráulica (días) del agua en el STAR, estos datos se multiplicaron entre sí y se dividieron por el área superficial del sistema (m^2).</p> <p>Se le asignó un mayor puntaje al tipo de STAR cuyo promedio de capacidades instaladas fue mayor, lo cual significa que el STAR tiene capacidad para recibir mayores cantidades de agua para tratar.</p> |
| | Nivel de tratamiento | <p>Se realizó mediante datos teóricos.</p> <p>Se le asignó un mayor puntaje al tipo de STAR que logre un nivel más alto de tratamiento.</p> |

| Tipo de Viabilidad | Variables relevantes | Método de Análisis de Variable |
|--------------------|--|---|
| | Eficiencia de remoción | <p>Se estimó en porcentaje de eficiencia (%E) y se determinó a partir del DQO registrado en los reportes operacionales del efluente (DQO) del STAR brindado por cada Beneficio y el DQO del afluente (DQOe) tomado de los análisis de agua cruda realizados por el LAA, como parte de esta investigación (ver apartado 3.6.2 inciso J). Se calculó mediante la siguiente ecuación:</p> $\%E = \frac{(DQOe - DQOs)}{DQOe} \times 100$ <p>Se asignó un mayor puntaje al tipo de STAR que en promedio presentó porcentaje más alto, lo cual significa que tiene mayor eficiencia de depuración del agua.</p> |
| | Manejo de lodos | <p>Se estimó como el porcentaje del área de emisión total de cada Beneficio donde se necesita extracción de lodos. Para ello, se determinó el porcentaje de superficie que ocupan las unidades a las que se les extraen lodos, respecto al área total del STAR.</p> <p>Se asignó un mayor puntaje al tipo de STAR que en promedio presentó un porcentaje menor, ya que esto significa que del área total del STAR, el área donde debe realizarse extracción es poca.</p> |
| | Flexibilidad al cambio de características del afluente | <p>Se realizó mediante datos teóricos.</p> <p>Se le asignó un mayor puntaje al tipo de STAR que tenga más flexibilidad antes los cambios del afluente, sin afectar su eficiencia.</p> |
| | Replicabilidad | <p>Se realizó mediante datos teóricos.</p> <p>Se le asignó un mayor puntaje al tipo de STAR que posea más facilidad de ser replicado.</p> |
| | Cumplimiento de legislación y normas | <p>Se evaluó el cumplimiento con el RVRAR. Esto se realizó mediante la información de los reportes operacionales aportados por cada Beneficio y con datos teóricos.</p> <p>Se asignó un puntaje mayor al tipo de STAR que contara con una mayor cantidad de Beneficios cumpliendo con los parámetros asignados por el RVRAR.</p> |

| Tipo de Viabilidad | VARIABLES RELEVANTES | Método de Análisis de Variable |
|---------------------------|---|---|
| | Personal requerido | <p>Se obtuvo mediante información directa, solicitada a cada Beneficio, sobre el requerimiento o no de una persona encargada exclusivamente del STAR.</p> <p>Se asignó mayor puntaje al tipo de sistema, que, según la información recolectada, posee menos porcentaje de Beneficios con la necesidad de asignar a una persona exclusiva para el sistema.</p> |
| | Capacitación personal | <p>Se obtuvo mediante información directa, solicitada a cada Beneficio, sobre la duración de la capacitación para el operario del STAR.</p> <p>Se asignó mayor puntuación al tipo de STAR que en promedio requiera menor tiempo para capacitar a su personal.</p> |
| | Tiempos de retención hidráulica | <p>Se obtuvo mediante información directa, solicitada a cada Beneficio, sobre la duración de la estadía en el STAR, de un metro cúbico de agua residual, desde que ingresa al sistema, hasta que sale.</p> <p>Se le asignó un puntaje mayor al tipo de STAR cuyo promedio de tiempos retención hidráulica fue menor, lo que significa que trata el agua residual en menor cantidad de tiempo.</p> |
| | Mantenimiento de las Características Deseadas | <p>Se realizó mediante datos teóricos.</p> <p>Se asignó mayor puntaje al tipo de STAR cuyas características fisicoquímicas y biológicas sean más fáciles de mantener.</p> |
| | Traslado de aguas de Beneficio al STAR | <p>Se obtuvo mediante información directa, solicitada a cada Beneficio, sobre el método de traslado de sus aguas residuales al STAR.</p> <p>Se asignó mayor puntaje al tipo de STAR, cuyos Beneficios utilizan en mayor proporción el método de gravedad vs el de bombeo.</p> |

| Tipo de Viabilidad | Variables relevantes | Método de Análisis de Variable |
|----------------------|--|--|
| Viabilidad Económica | Costo de construcción e implementación | <p>Se obtuvo mediante información solicitada a cada Beneficio sobre:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Año de construcción del STAR 2. Costo de construcción del STAR <p>Posteriormente, para poder comparar los diferentes precios de construcción entre sí, se calculó el valor actual del precio de construcción de cada STAR; mediante el <i>software</i> Dinero en el Tiempo, que calcula la inflación del dinero tomando como dato los índices de precios al consumidor (IPC) del año inicial y el actual (registrados por la OCDE), de la siguiente manera:</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 10px auto;"> $Valor\ actual = Valor\ inicial \times \frac{IPC\ año\ actual}{IPC\ año\ inicial}$ </div> <p>Se le asignó un puntaje mayor al tipo de STAR, cuyo promedio de los costos de construcción e implementación del sistema, fuera menor.</p> |
| | Costo por consumo energético | <p>Se estimó en kWh/mes y se obtuvo, en algunos casos, de forma directa mediante la información solicitada a cada Beneficio, sobre el consumo energético del STAR. En los casos en los que no se contó con este dato pero sí con la cantidad de motores (#M) que se utilizan en el sistema, los caballos de fuerza (HP) correspondientes a cada motor y la cantidad de horas que se mantienen en funcionamiento al día (h/día), se estimó de la siguiente manera:</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 10px auto;"> $\frac{kWh}{mes} = \#M \times HP \times \frac{0,7457kW}{1HP} \times \frac{h}{día} \times \frac{día}{mes}$ </div> <p>Se asignó un puntaje mayor al tipo de STAR, cuyo promedio de costos energéticos de los sistemas de cada Beneficio, resultó ser menor.</p> |
| | Costo de pretratamiento las aguas | <p>Se obtuvo mediante datos teóricos.</p> <p>Se le asignó un puntaje mayor al tipo de sistema que implica un costo menor en pretratamiento.</p> |

| Tipo de Viabilidad | Variables relevantes | Método de Análisis de Variable |
|----------------------|--|--|
| | Costo asociado al personal | Se obtuvo mediante información proporcionada por los Beneficios, sobre el costo del salario del encargado de operar el STAR. En los casos en los que el operario no dedica su jornada completa al STAR, el dato correspondiente a este salario se dividió a la mitad. Se le asignó un mayor puntaje al tipo de sistema que en promedio implique un menor costo asociado a los salarios del operario. |
| | Costo de mantenimiento | Se obtuvo mediante información directa, solicitada a cada Beneficio, sobre el costo anual del mantenimiento del STAR. Se asignó un puntaje mayor al tipo de sistema, cuyo promedio de costos fue menor. |
| | Beneficios económicos de la implementación | Se realizó mediante datos teóricos. Se asignó un mayor puntaje al tipo de STAR que contempla mayores y mejores beneficios económicos, con su implementación. |
| Viabilidad Ambiental | Ahorro de combustibles fósiles | Se realizó mediante datos teóricos. Se asignó un mayor puntaje al tipo de STAR, que con su utilización pueda generar un ahorro de combustibles fósiles. |
| | Posibles impactos ambientales | Se realizó mediante datos teóricos. Se asignó un mayor puntaje al tipo de STAR que presente menor potencialidad de generar impactos ambientales negativos en el recurso hídrico, principalmente. |
| | Atracción de vectores de enfermedades | Se realizó mediante datos teóricos. Se asignó una puntuación mayor al tipo de STAR que evidencia menos atracción de vectores de enfermedades, como moscas, principalmente. |
| | Eficiencia en el uso del recurso hídrico | Se realizó mediante datos teóricos. Se asignó un puntaje mayor al tipo de STAR cuya utilización genere una reducción en consumo hídrico. |
| | Entorno ecológico | Se realizó mediante datos teóricos. Se asignó un puntaje mayor al tipo de STAR que evidencia compartir mejor el entorno con flora y fauna y poseer mayor valor paisajístico. |

| Tipo de Viabilidad | Variables relevantes | Método de Análisis de Variable |
|--------------------|--------------------------|--|
| | Emisión de GEI al aire | Se estimó en (kg CO ₂ e/ ff) y el dato se determinó mediante los resultados obtenidos por este proyecto. Se asignó un mayor puntaje al STAR cuyo promedio de las emisiones de CO ₂ e de los Beneficios fue menor. |
| | Efluente del tratamiento | Se realizó mediante datos teóricos. Se asignó mayor puntaje al tipo de STAR que evite generar un efluente. |

- f) El valor de cada variable se multiplicó por su respectivo FI_x y se dividió entre la puntuación máxima posible cuyo valor es 3 para obtener su “Puntaje Relativo de Variable” (PRV).

$$Puntaje\ Relativo\ (PRV) = \frac{Puntaje\ de\ variable\ (PV) \times Factor\ de\ Importancia\ (FI_x)}{Puntaje\ máximo\ posible\ (3)} \quad (6)$$

- g) A partir de la sumatoria de todos los PRV, se determinó el puntaje relativo total de cada tipo de viabilidad.
- h) Posteriormente, se analizaron en conjunto los resultados de cada fase de la viabilidad, para realizar una integración de las variables técnica, ambiental y económica.

4. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Etapa I: Diagnóstico

A continuación, se muestran los principales resultados generados en la etapa de diagnóstico.

El 41% de los 27 STAR de los Beneficios diagnosticados, correspondió a lagunas anaerobias, el 15% a reactores anaerobios de flujo ascendente, el 18 % a drenajes y el 26% a aspersión sobre pasto estrella.

Como se muestra en la Figura 7, se obtuvo que el 89% de los 27 Beneficios de la muestra no realizaban ningún tipo de análisis fisicoquímico a las aguas que ingresan a los STAR, por lo tanto, no pueden conocer con certeza la calidad del agua residual que sale del sistema y ni la eficiencia de remoción de este. El restante 11%, que es el equivalente a tres Beneficios, sí realiza algún tipo análisis de sus afluentes.

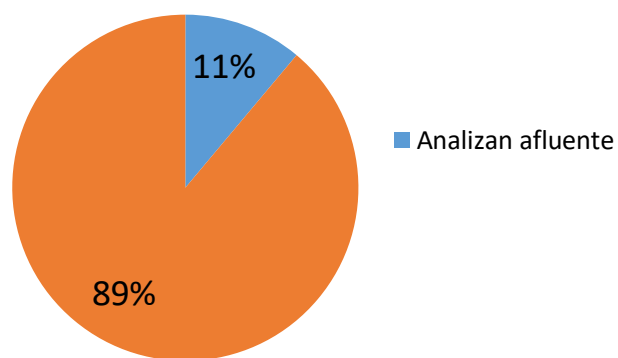


Figura 6. Porcentaje de Beneficios que realizan análisis fisicoquímicos en los afluentes

La eficiencia de remoción (también llamada eficiencia de tratamiento), de acuerdo con Gálvez (2013), es la relación entre la carga de contaminante a la entrada y la carga de

contaminante a la salida del proceso de tratamiento. Cortés *et al.* (2016) menciona que este parámetro es uno de los aspectos por considerar antes de diseñar un STAR.

Conocer la eficiencia de remoción instalada del sistema de tratamiento, de acuerdo con la EPA (2013), es un insumo para mejorar la eficiencia energética del sistema de tratamiento, lo cual puede producir beneficios ambientales y económicos. Este parámetro está definido en función de los valores promedios de la DBO a la entrada y a la salida del STAR.

Se han llevado a cabo estudios que determinan la eficiencia de remoción de diversos tipos de STAR. Por ejemplo, Gutiérrez *et al.* (2014) reportan que en Colombia se han hecho estudios en laboratorio para la determinación de eficiencias de remoción de sólidos suspendidos (SS) y DBO en sistemas que llevan a cabo un proceso de sedimentación-filtración, donde reportan altas eficiencias de remoción para sólidos suspendidos (superiores al 98%), pero muy bajas para la remoción de DBO (en promedio cercanas al 20%).

Las eficiencias de remoción para DBO reportadas para otros sistemas estudiados como el reactor anaerobio de flujo ascendente superan el 80% (Orozco, citado por Gutiérrez *et al.* 2014), mientras que Sistemas Modulares de Tratamiento Anaerobio alcanzan valores hasta de 83%.

Los análisis fisicoquímicos de las aguas que salen de los distintos sistemas son realizados únicamente por un 48% de los Beneficios. Como se observa en la Figura 8, este valor corresponde a un 37% de los STAR con lagunas anaerobias y un 11% con reactores anaerobios de flujo ascendente.

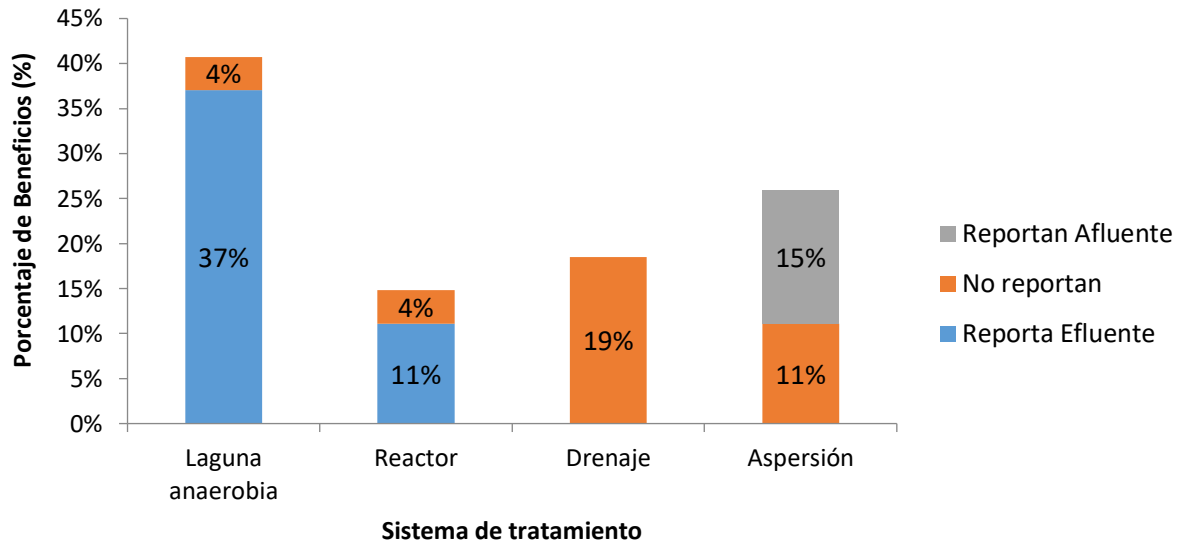


Figura 7. Porcentaje de Beneficios que reportan resultados de análisis fisicoquímicos de las aguas residuales.

Como se observa en la Figura 8, el 38% de los Beneficios no reportan resultados de análisis fisicoquímicos independientemente del tipo de sistema que utilizan. De este total, los STAR que utilizan drenajes corresponden a un 19% y los que utilizan aspersión, a un 11%. Este alto porcentaje se fundamenta en la inexistencia de un punto de vertido a la salida de dichos sistemas. Al no ejecutarse mediciones de análisis fisicoquímicos tanto a la entrada como a la salida de los sistemas, no es posible medir su eficiencia de remoción.

El 15% de los STAR reportan resultados de análisis de las entradas a los sistemas (afluentes), siendo este porcentaje integro a los sistemas de aspersión. Cabe resaltar que el método de STAR por aspersión sobre pasto estrella no reporta resultados de análisis o se reportan únicamente sus afluentes, esto debido a que en este tipo de tratamiento el agua al final de sistema se incorpora a los procesos de evapotranspiración o es infiltrada en el

suelo, por lo que no es posible realizar mediciones de parámetros fisicoquímicos y así determinar su eficiencia.

Buscando un mayor control sobre el tratamiento con sistemas de aspersión, el Ministerio de Salud ha establecido algunos requisitos para su implementación, a saber (Peters 2009):

- El área por usar para el sistema de tratamiento deberá contar con al menos dos pozos de monitoreo ubicados de tal forma que pueda medirse el impacto en las aguas subterráneas de este sistema.
- Para áreas mayores a dos hectáreas deberá perforarse un pozo de monitoreo adicional por hectárea o fracción adicional de terreno.
- El laboratorio contratado deberá realizar la medición del caudal de entrada y el análisis de los siguientes parámetros en todos los pozos: pH, sólidos sedimentables, temperatura, DBO, DQO, Grasas y Aceites, Sólidos Suspendidos Totales y Sustancias activas al azul de metileno contenidos en la versión vigente del Reglamento de Vertidos y Reúso de Aguas Residuales N° 33601.

Los resultados de las mediciones de estos parámetros deberán adjuntarse al reporte operacional. Sin embargo, los Beneficios no cuentan con dichos requisitos.

El 89% de los Beneficios desconoce la capacidad de tratamiento instalada en los STAR. El área requerida para cada sistema depende de la capacidad de tratamiento que tenga Muñoz (2011) menciona que la capacidad de retención del suelo, las pérdidas de agua y la frecuencia de riego son parámetros que se deben conocer para el diseño del sistema de riego; sin embargo, se pudo determinar que muchos de los encargados de los STAR o inclusive del Beneficio no conocen la capacidad de tratamiento de sus sistemas.

En el caso de los STAR por aspersión, el desconocimiento de la capacidad del tratamiento puede estar generando que se esté vertiendo más agua de lo que el sistema puede manejar, provocando escorrentías, así como percolación profunda, lo cual podría generar deterioro de la calidad de las aguas receptoras (Montero 2000).

Al existir únicamente un 11% de los Beneficios que conocen realmente la capacidad instalada de sus sistemas de tratamiento, se evidencia una gran deficiencia de operación, ya que sin este dato no puede conocer a ciencia cierta si sus sistemas están siendo sobresaturados o subutilizados, pudiéndose ver afectado el correcto proceso de depuración de las aguas. Al no conocer la capacidad instalada del sistema tratamiento, de acuerdo con Tejada *et al.* (2013), puede que no se opere a las condiciones de diseño y, por lo tanto, se sobrecargue o subutilice el sistema, generando en este un mal funcionamiento.

De los 27 Beneficios diagnosticados, siete reportaron el STAR por aspersión sobre el pasto estrella como sistema principal para el tratamiento de las aguas residuales. Sin embargo, cuatro Beneficios más presentaban un sistema similar a los campos de aspersión, pero se utilizaban como método secundario de tratamiento. De este total de once Beneficios donde se aplican métodos de aspersión, se obtuvo mediante el diagnóstico que en diez de ellos no se cumplían a cabalidad las directrices legales establecidas por el Ministerio de Salud para este tipo de actividad, y cabe resaltar que nueve de estos Beneficios se localizan en la zona de Los Santos y reportaron ser de reciente creación.

Dichas directrices se encuentran en el oficio DGS-801-09 del Ministerio de Salud del 22 de mayo del 2009 y estipulan que para utilizar el campo de pasto estrella como sistema de tratamiento se debe cumplir con (Peters 2009):

- Contar con un pretratamiento de minimización de la producción de agua mieles (solo se puede utilizar en época seca) y tamizado.
- Visto bueno de la ubicación del tratamiento de aguas mieles.
- Resolución de viabilidad ambiental de SETENA.
- Presentar estudios técnicos que incluyen tránsito de contaminantes, hidrología, hidrogeología, entre otros.
- Presentar planos, memoria de cálculo y manual de operación y mantenimiento del sistema.
- Contar con al menos dos pozos de monitoreo y un pozo adicional por cada hectárea en áreas mayores a dos hectáreas, donde el laboratorio contratado medirá los parámetros que se deben incluir en el reporte operacional del sistema.

No obstante, según mencionaron los encargados de los Beneficios, la inscripción de dichos sistemas se realiza mediante una declaración jurada únicamente, sin la necesidad de al menos una visita de los encargados del Ministerio de Salud. Este comportamiento evidencia una carencia en el proceso de otorgamiento de dichos permisos donde se podrían estar generando impactos ambientales que pueden ser fácilmente evitables, pero que a su vez pueden producir grandes consecuencias negativas al no ser eficientemente gestionados.

El utilizar el riego como tratamiento de aguas residuales sin un manejo adecuado puede originar varios efectos negativos derivados de todas las sustancias químicas, bacterias, virus y otros patógenos que contienen y que pueden generar un impacto sobre la salud humana, en la producción agrícola y en el cambio de uso de suelo (Núñez 2015).

Como se muestra en la Figura 9, el 26% de los Beneficios declaran y tienen inscrito en el Icafe un tipo de sistemas de tratamiento, cuando en realidad poseen uno distinto o cuentan con un método de invención propia, que no puede ser considerado sistema de tratamiento. Esto se debe a la poca fiscalización y el no contar con el conocimiento adecuado.

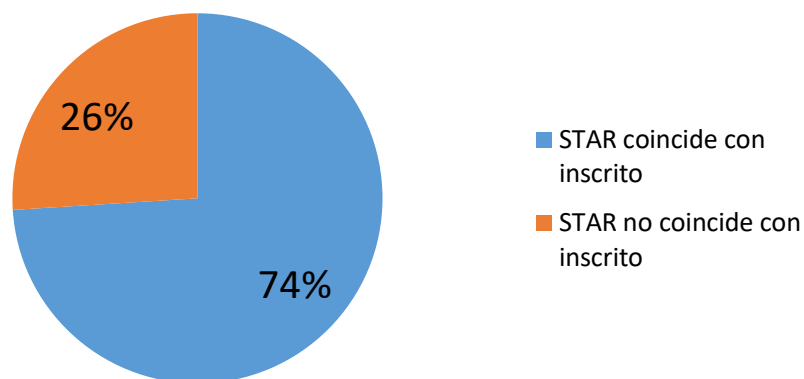


Figura 8. Coincidencia del tipo de STAR inscrito en los Beneficios

Algunos Beneficios declaran que poseen un STAR por aspersion sobre pasto estrella. Estos sistemas consisten en la aplicación intermitente del efluente por medio de rociadores o tubos con aberturas, y después se cuela a través del suelo hacia las aguas del subsuelo o se pierde en evapotranspiración (Henry y Heinke, 2000); sin embargo, lo que se encuentra en campo es que riegan el agua con una manguera en un sitio donde hay diferentes especies de plantas y árboles, además de realizarse en terrenos con pendientes muy pronunciadas, donde el agua no logra percolar en el suelo.

Otro caso es que se indica que cuentan con un sistema de drenaje o pozo de infiltración. Teóricamente hablando este consiste en un hoyo profundo realizado en la tierra para infiltrar el agua residual sedimentada en el tanque séptico, y contar con capas de terreno, grava, entre otros (Espinoza 2014). En contraste, lo que se encuentra en los Beneficios son

zanjas que no cuentan con las características para propiciar la correcta infiltración y donde se deposita el agua sin un tratamiento previo.

Al utilizar sistemas de infiltración que no cumplen con las características para propiciar el tratamiento del agua residual, según explica Arias (2010), se pueden dar problemas como que la distancia sea muy corta para que se dé la sedimentación o que el tamaño no sea el adecuado generando una sobrecarga hidráulica u orgánica, entre otros.

En lo que respecta al grado de control de los STAR y como se observa en la Figura 10, se encontró que en un 37% de los Beneficios existe un alto grado de control técnico sobre ellos, y este valor corresponde mayoritariamente a sistemas con lagunas y reactores anaerobios. Esto puede deberse a los cuidados que deben tener estos sistemas, por ejemplo, según Reutelshöfer (2015), en los reactores anaerobios de flujo ascendente es vital mantener el filtro en limpieza constante para eliminar los lodos acumulados, así como en las lagunas anaerobias se debe limpiar cada dos a cinco años el lodo de la laguna.

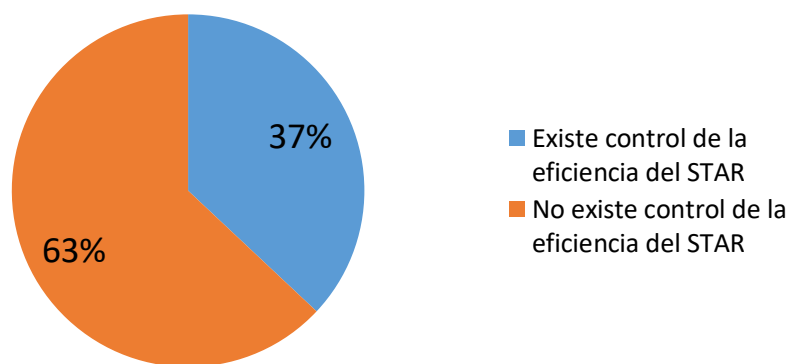


Figura 9. Control de los Beneficios sobre la eficiencia de los STAR

Los STAR mencionados normalmente cuentan con fiscalización, como la presentación de reportes operacionales ante el Ministerio de Salud. En el reporte operacional de los sistemas

de tratamiento de aguas producidas por Beneficios de café, según el RVRAR, se deben incluir los siguientes parámetros: caudal, pH, temperatura, sólidos sedimentables, grasas y aceites, sustancias activas al azul de metileno, DBO, DQO y sólidos suspendidos totales.

En contraste, el 63% de los Beneficios donde no existe un alto grado de control técnico corresponden en su mayoría a sistemas con drenajes y aspersión. En estos STAR se evidenció poco conocimiento técnico-ambiental en cuanto al destino de sus aguas residuales, arrojándolas mediante tuberías a terrenos sembrados con gran variedad de vegetación, en sitios con altas pendientes, y sin la implementación de canales perimetrales o pozos de monitoreo, lo que implica que no pueden tener ningún tipo de control sobre sus aguas residuales.

Este comportamiento podría atribuirse a que los STAR por aspersión corresponden a un tipo de sistema de tratamiento relativamente nuevo, oficializado en el año 2009 por el Ministerio de Salud, de acuerdo con Chacón (2011), y que es distinto a los otros sistemas al no tener un efluente.

Por último, el diagnóstico arrojó como resultado que, de los 27 Beneficios diagnosticados, únicamente el 48% de ellos contaban con las condiciones necesarias para ser muestreados mediante el método de campanas estáticas, ya que solo estos reunían los requerimientos técnicos y legales aplicables. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 11.

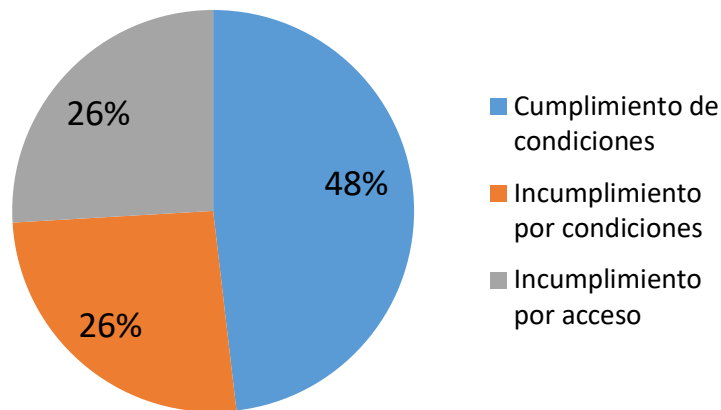


Figura 10. Cumplimiento de las condiciones de muestreo de STAR de los Beneficios

El 26% de los Beneficios diagnosticados no cumplía con requisitos legales propios del STAR, entre los que se incluye contar con un tratamiento de aguas mieles y tamizado para el caso de los campos de aspersión sobre pasto estrella. (Peters 2009).

El restante 26% de los Beneficios presentaba limitada accesibilidad a los STAR para poder llevar a cabo los muestreos con campanas estáticas, ya que la colocación de las cámaras requiere de la navegación en un bote con espacio suficiente para la cámara y las personas que llevan a cabo el muestreo, siendo estas condiciones carentes en algunos de los Beneficios visitados.

4.2. Etapa II: Medición de generación de gases de efecto invernadero

Como resultado de la etapa de diagnóstico se eligieron nueve Beneficios que cumplían con las condiciones requeridas para llevar a cabo los muestreos para la medición de los gases de efecto invernadero. La ubicación de los Beneficios seleccionados se muestra en el Apéndice 3.

Los nueve Beneficios seleccionados para la medición se muestran en el Cuadro 10, incluyendo el tipo de STAR que utilizan, la región cafetalera a la que pertenecen y la clasificación del estado de maduración de la zona productiva. Además, se muestra la época de cosecha muestreada que es clasificada como inicio, óptimo y final de cosecha. El óptimo o pico de cosecha corresponde al período donde se da el mayor procesamiento de café.

Cuadro 10. Tipo de sistema de tratamiento de aguas residuales, región cafetalera, zona productiva y etapas de la cosecha muestreadas, para cada uno de los nueve Beneficios en estudio

| Sistema de tratamiento de aguas residuales | Beneficio | Región Cafetalera | Clasificación estado de maduración de zona productiva | Época de cosecha muestreada | | |
|---|---|--------------------------|---|-----------------------------|--------|-------|
| | | | | Inicio | Óptimo | Final |
| Lagunas Anaerobias | Santa Rosa Ltda. | Turrialba | Temprana | x | x | xx* |
| | CoopeAtenas R.L. | Valle Central Occidental | Media | x | x | x |
| Lagunas Anaerobias/Aspersión sobre pasto estrella | Café de Altura de San Ramón Especial S.A. | Valle Central Occidental | Media | x | | x |
| | CoopeAgri R.L. | Pérez Zeledón | Temprana | x | x | x |
| Reactor anaerobio | CooproNaranjo R.L. | Valle Central Occidental | Media | x | | x |
| | La Eva S.A. | Valle Central Occidental | Media | | x | x |
| Aspersión sobre pasto estrella | Hnos. Vargas Hidalgo S.A. | Valle Central | Media | x | | x |
| | Las Marías S.A. | Valle Central | Media | x | x | x |
| | CoopeTarrazú R.L. | Los Santos | Tardía | x | x | x |

*El Beneficio Santa Rosa fue muestreado dos veces en finales de cosecha.

El cuadro anterior muestra que algunos Beneficios fueron muestreados solamente en inicios y finales, otros en inicios y pico, mientras que otros sí pudieron ser medidos en las tres épocas de cosecha. Esto se debe a que el estudio estaba sujeto a ciertas variables como las condiciones de la cosecha del cultivo, la producción y el clima, siendo este último un factor determinante en la producción de café, ya que influye en el rendimiento de la producción y su calidad (Arcila, citado por Moreira y Castro 2016).

Las épocas de cosechas en Costa Rica varían según la zona de maduración, la cual es dependiente de la altitud de la zona de producción. Así, las zonas de maduración temprana son Turrialba, Coto Brus y Pérez Zeledón, donde la cosecha se da entre los meses de octubre y noviembre; la zona de maduración media se da en el Valle Central y Occidental entre los meses de diciembre y enero; y por último, la zona de maduración tardía se da en la zona de Los Santos entre enero y febrero (Café de Costa Rica 2015).

Algunos Beneficios solo pudieron ser medidos en dos épocas de cosecha, en vez de las tres propuestas inicialmente, ya que la investigación inició al final de la cosecha 2015-2016. Además, para la cosecha 2016-2017, las características climáticas provocaron que el período de cosecha se atrasara y se redujera el procesamiento del café en la mayoría de los Beneficios.

Los incrementos significativos de precipitación lluviosa durante el mes de noviembre de 2016, generados principalmente por fenómenos atmosféricos, entre los que destaca el huracán Otto, coincidieron con la época de maduración en Pérez Zeledón y Coto Brus, con la consecuente caída de frutos y pérdida significativa de producción (Icafe 2017). Por esta razón, se generó menos agua residual, y los sistemas de tratamiento se encontraban

operando con una mínima cantidad del afluyente o se hizo uso de otros sistemas que no contenían la suficiente cantidad de agua residual para poder llevar a cabo las mediciones.

Algunas unidades de los diferentes sistemas fueron excluidas de los muestreos y se muestran en el Cuadro 11. Esto se debió principalmente a que algunos sitios como lagunas y lechos de lodos no permitían la accesibilidad con los equipos de muestreo, ya que tenían gran presencia de vegetación; esta es una característica esperable, ya que según explica Korsak (2010), en las lagunas de oxidación suele haber presencia de nenúfares como los lirios. Otras unidades como tanques temporales y sedimentadores tenían tiempos de residencia muy cortos, o poseían tamaños muy pequeños, que no fueron considerados de gran importancia para la emisión de gases de efecto invernadero.

Cuadro 11. Unidades de los STAR excluidas del muestreo

| STAR | Beneficio | Unidades | N° Secciones | Medida por sección (m ²) | Medida por unidad (m ²) | Razón de la exclusión | Área total de emisión (m ²) |
|--------------------|---|-----------------|--------------|--------------------------------------|-------------------------------------|---|---|
| Lagunas anaerobias | Santa Rosa Ltda. | Sedimentador | 3 | 3 | 9 | Tamaño insuficiente de la unidad | 417 |
| | | Lagunas | 1 | 400 | 400 | La vegetación impidió la medición | |
| | | Lecho de lodos | 1 | 8 | 8 | | |
| | Café de Altura de San Ramón Especial S.A. | Tanque temporal | 2 | 18 | 36 | Tiempo de residencia incompatible con el muestreo | 36 |
| | CoopeAtenas R.L. | Tanque temporal | 2 | 7 | 14 | Tiempo de residencia incompatible con el muestreo | 4185 |

| STAR | Beneficio | Unidades | N° Secciones | Medida por sección (m ²) | Medida por unidad (m ²) | Razón de la exclusión | Área total de emisión (m ²) |
|-------------------|--------------------|-----------------------|--------------|--------------------------------------|-------------------------------------|---|---|
| | | Lagunas | 1 | 2100 | 4100 | Número de muestras incompatible con el muestreo | |
| | | Lecho de lodos | 1 | 25 | 71 | | |
| | CoopeAgri R.L. | Lagunas | 4 | 990 | 24210 | Número de muestras incompatible con el muestreo | 24210 |
| | | | 5 | 4050 | | | |
| Reactor Anaerobio | CooproNaranjo R.L. | Sedimentador primario | 2 | 32,5 | 65 | Insuficiencia de agua en el sistema | 65 |

Se observa en el Cuadro 11, en los casos de CoopeAgri y CoopeAtenas se excluyeron unidades debido a que por su gran tamaño representaban un aumento significativo de muestras, lo que no era compatible con el presupuesto y la logística del proyecto; sin embargo, estas exclusiones pueden haber dado lugar a errores a la hora de la cuantificación total de emisiones, ya que el aporte de estas lagunas excluidas fue calculado mediante extrapolación de las lagunas muestreadas.

Los flujos de emisión de metano, óxido nitroso y dióxido de carbono obtenidos para cada punto de muestreo en los Beneficios no se muestran en este documento, debido a su gran extensión, sin embargo, pueden ser solicitados a la autora¹.

¹ Correo electrónico: natyfujim@hotmail.com

Los flujos obtenidos para cada Beneficio se agruparon según la época de cosecha y se calculó un flujo promedio total para cada uno de los GEI analizados. Los resultados se muestran en la Figura 13.

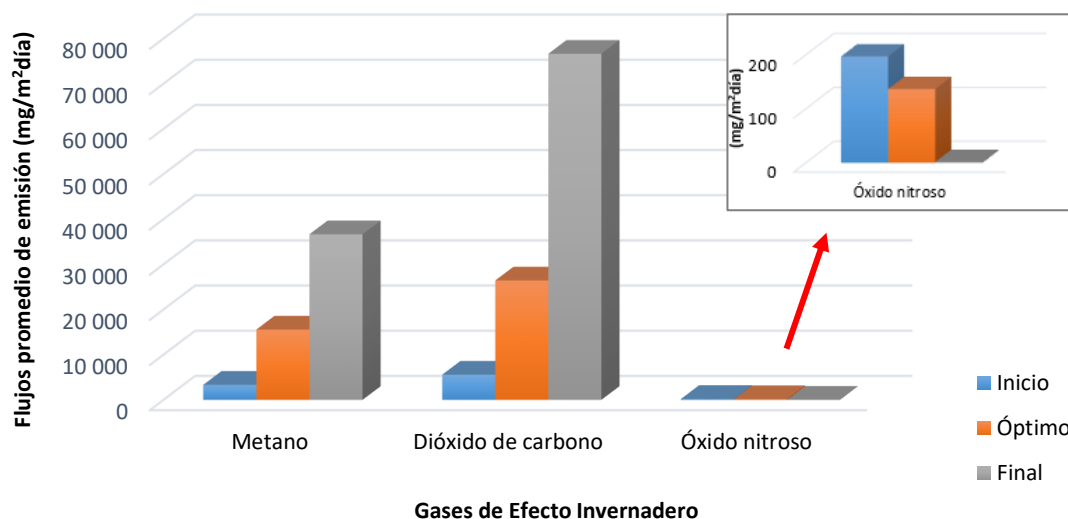


Figura 11. Flujos promedio totales de los GEI (mg/m²día) según la época de cosecha de los Beneficios de Café

Como se puede observar, existe una tendencia creciente en el tiempo en las emisiones de metano y dióxido de carbono. En el caso del óxido nitroso, este gas presenta un comportamiento inverso posiblemente debido a que con el avance del período de cosecha se aumenta la carga orgánica que se aspersa sobre el suelo, provocando que el oxígeno disuelto sea utilizado mayoritariamente en la degradación de especies carbonáceas en detrimento de la oxidación del nitrógeno.

Además, se puede observar que las emisiones promedio de CO₂ y CH₄ son de mayor magnitud en comparación con el óxido nitroso, efecto que se verá reflejado posteriormente, en los factores de emisión obtenidos.

Estas tendencias pueden ser analizadas específicamente en cada uno de los Beneficios estudiados. Por ejemplo, las concentraciones promedio de los GEI obtenidas para una laguna anaerobia (Beneficio CoopeAtenas R.L.), un reactor anaerobio (Beneficio Coopronaranja R.L.) y aspersión sobre pasto estrella (Beneficio Las Marías) se muestran en la Figura 14.

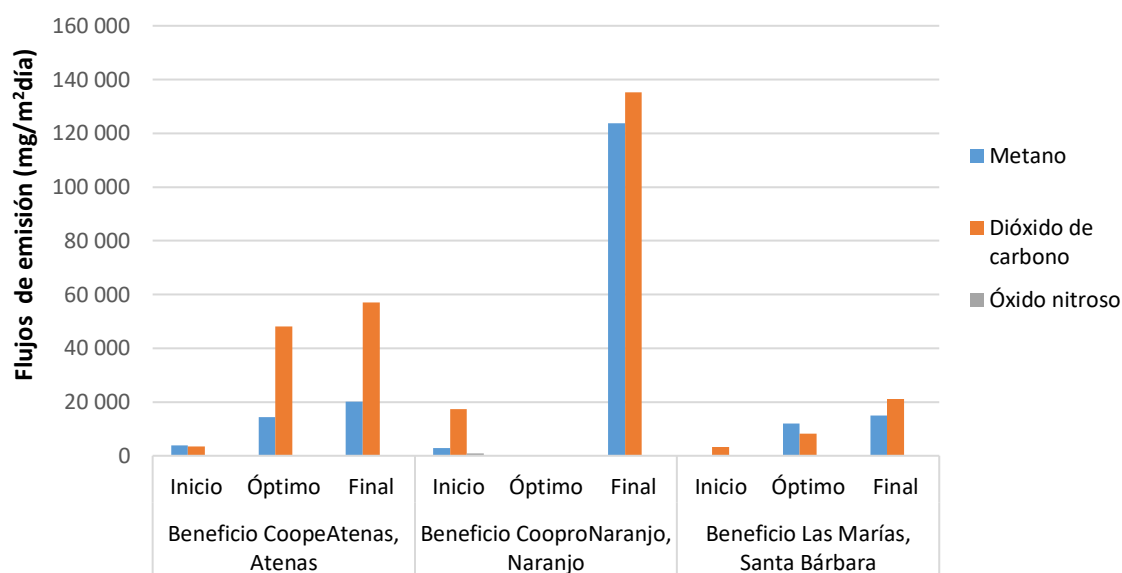


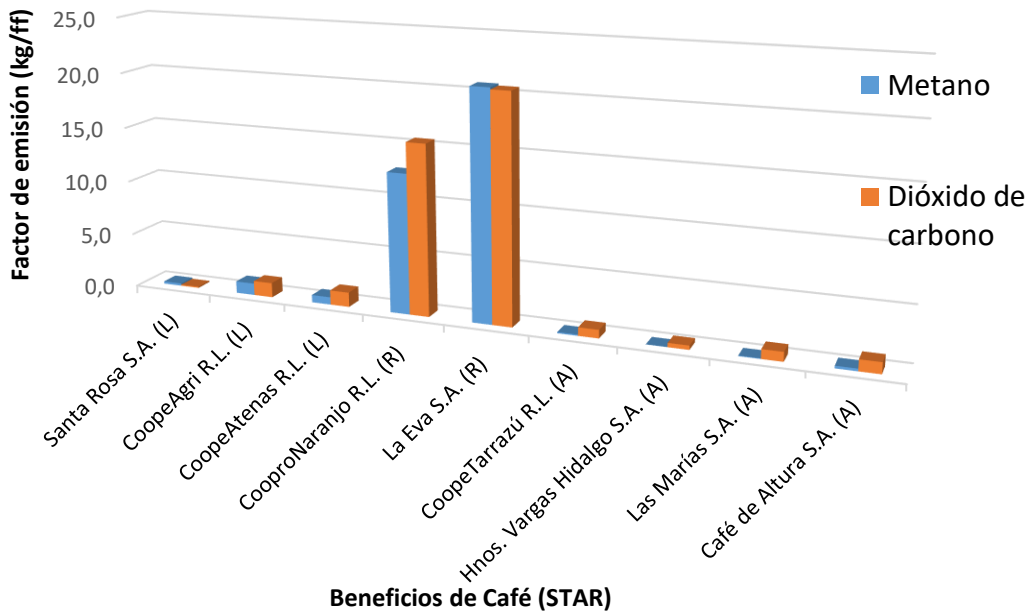
Figura 12. Flujos promedio de los GEI ($\text{mg}/\text{m}^2\text{día}$) para distintos tipos de STAR según el período de cosecha de los Beneficios de Café.

Como se mencionó anteriormente no en todos los Beneficios se logró medir en las tres épocas, tal es el caso de del Beneficio Coopronaranja R.L. donde no se pudo medir en el óptimo, razón por la cual no aparece en la figura anterior.

En términos generales, las emisiones de GEI presentaron un incremento en función del avance del período de la cosecha, lo cual es concordante con el hecho de que, al avanzar el procesamiento del café, se presenta un requerimiento mayor de consumo de agua que se

traduce en una mayor generación de aguas residuales, las cuales impactan de manera directa en el sistema de tratamiento, al generar mayores cantidades de materia orgánica.

Posteriormente, los valores de los flujos de emisión promedio de GEI se convirtieron a factores de emisión en función de la cantidad de fanegas procesadas, y clasificándolos según el tipo de tecnología principal utilizada en el STAR. Los resultados para metano y óxido nitroso en kilogramos de emisión de gas por fanega procesada se muestran en la Figura 15.



Simbología: Laguna anaerobia = L; Reactor anaerobio = R, Aspersión = A.

Figura 13. Factores de emisión de metano y dióxido de carbono en kilogramos por fanega procesada (kg/ff) según el STAR implementado

Los sistemas con reactores anaerobios, como se observa en la Figura 15, representan factores de emisión de dióxido de carbono y metano, mucho mayores que los otros tipos de STAR. Este comportamiento es considerado como un indicador del adecuado

funcionamiento del sistema de tratamiento, ya que la generación de metano es producida por la actividad de las bacterias metanogénicas que se encuentran en este tipo de sistemas (Jaubert 2004).

Las lagunas anaerobias mostraron promedios de metano y dióxido de carbono de 0,7 kg/ff y 0,9 kg/ff respectivamente, los reactores anaerobios presentaron promedios de 16,7 kg CH₄/ff y 18,0 kg CO₂/ff, mientras que los campos de aspersión emiten alrededor de 0,1 kg CH₄/ff y 0,8 kg CO₂/ff (ver Apéndice 41).

Infante (2017) señala que en los reactores anaerobios de flujo ascendente más del 90% de la energía disponible por oxidación directa se transforma en metano. Este hecho, aunado a la posibilidad de recuperación energética al aprovechar el metano producido en el biogás generado, constituyen las principales ventajas de este tipo de STAR. Sin embargo, una cantidad apreciable del gas es perdido como emisiones difusas que no son aprovechadas por los Beneficios.

Cabe resaltar que las emisiones de los sistemas con reactores anaerobios cuantificadas en este del estudio muestran las emisiones de GEI que difunden hacia la atmósfera provenientes de la laguna de oxidación, del reactor anaerobio (porción de los gases que no son capturados por medio de las campanas) y las provenientes del sedimentador secundario.

La mayoría de las emisiones son capturadas en las cámaras del reactor para su posterior aprovechamiento, por lo que teóricamente no son liberadas a la atmósfera. Por ejemplo, las concentraciones de metano y dióxido de carbono que se generaron dentro de los sistemas con reactores anaerobios incluidos en el alcance de este estudio (Beneficio La Eva y el

Beneficio Coopronaranjo R.L.), fueron determinadas en el gas transportado por los ductos hacia el quemador y se muestran en las Figuras 16 y 17.

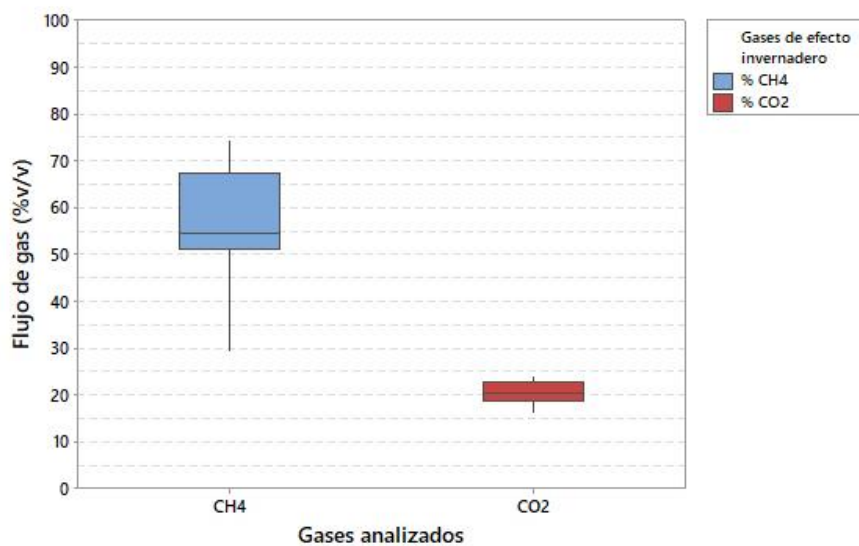


Figura 14. Porcentaje volumen-volumen %v/v de metano y dióxido de carbono generado por el reactor anaerobio de flujo ascendente del Beneficio La Eva S.A.

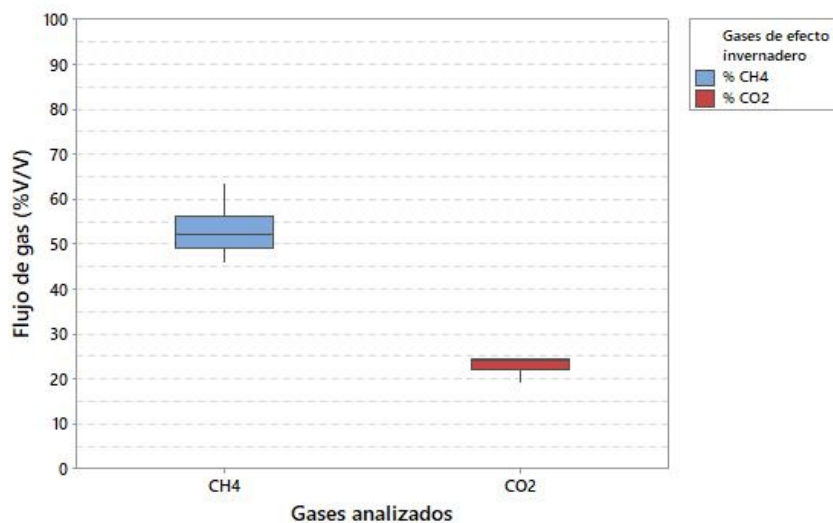
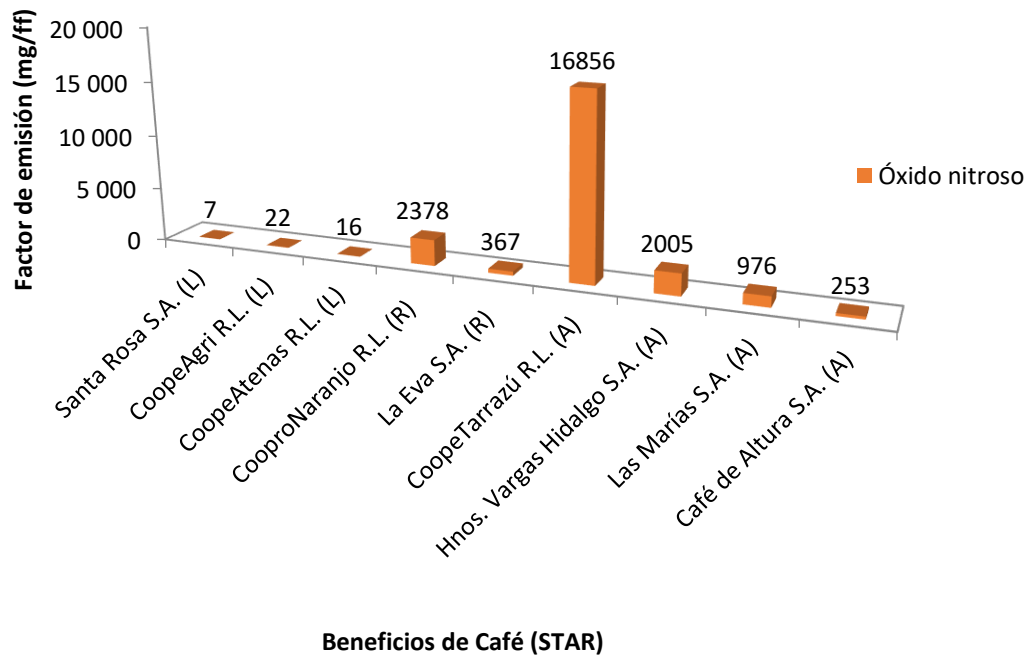


Figura 15. Porcentaje volumen-volumen %v/v de metano y dióxido de carbono generado por el reactor anaerobio de flujo ascendente del Beneficio Coopronaranjo R.L.

La composición del gas en ambos sistemas mostró una gran similitud, presentando valores promedio aproximados de un 53-55% de metano y un 20-25% de dióxido de carbono. Este comportamiento, como se mencionó anteriormente, es el objetivo de los reactores anaerobios donde se produce un flujo de biogás rico en metano para ser utilizado como fuente de energía.

Los factores de emisión para el óxido nitroso en miligramos por fanega procesada se muestran en la Figura 18, donde se puede denotar que los sistemas de campo de aspersión muestreados mostraron una mayor emisión de óxido nitroso en comparación con los otros STAR.



Simbología: Laguna anaerobia = L; Reactor anaerobio = R, Aspersión = A.

Figura 16. Factores de emisión de óxido nitroso en miligramos por fanega procesada (mg/ff) según el STAR implementado

Las lagunas anaerobias muestran promedios de óxido nitroso de 14,8 mg/ff, los reactores anaerobios presentan promedios de 1372,8 mg N₂O/ff, mientras que los campos de aspersión emiten alrededor de 5022,4 mg N₂O/ff (ver Apéndice 41).

Este comportamiento se fundamenta en la incorporación de la materia orgánica de las aguas residuales al ciclo del nitrógeno en el que participan las plantas, en este caso, el pasto estrella. El óxido nitroso, explica (Arenas 2015), se produce en el suelo principalmente por dos procesos del ciclo del nitrógeno: la nitrificación y la desnitrificación. El proceso de nitrificación sucede para que las plantas suplan sus requerimientos de nitrógeno, mientras que, en la desnitrificación, las bacterias del suelo reducen los nitratos y se obtienen como productos óxido nitroso y nitrógeno molecular, siendo este último proceso el causante de las concentraciones de este GEI.

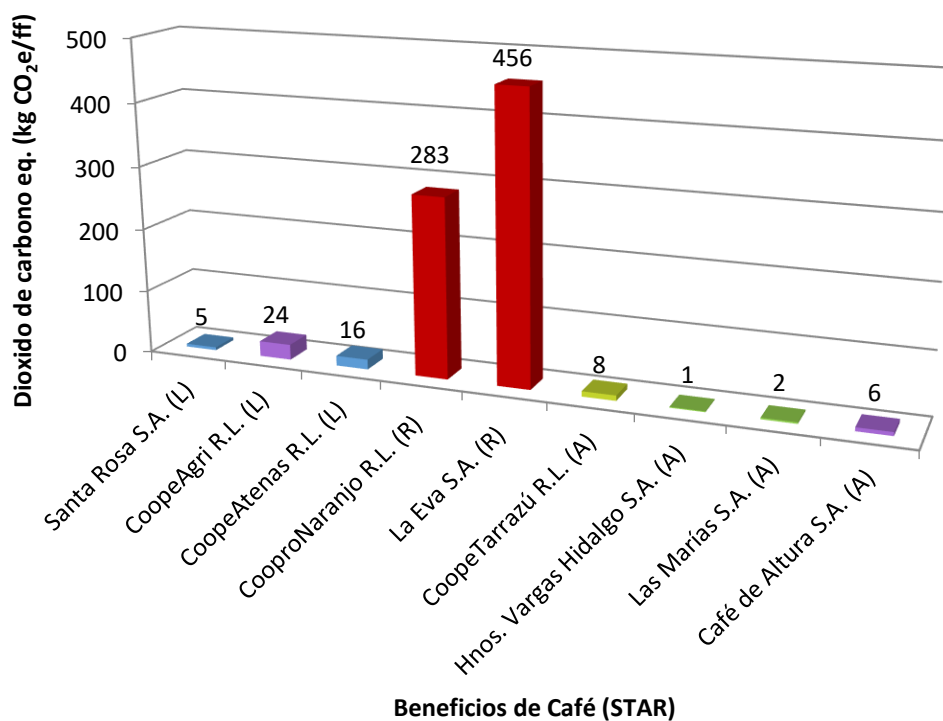
Por otro lado, en los STAR de lagunas y reactores anaerobios los flujos de emisión de óxido nitroso son prácticamente imperceptibles, como se puede observar en la Figura 14 para algunos Beneficios, ya que como mencionan Hristov *et al.* (2013), estos sistemas de tipo anaerobio se caracterizan por la conversión de la materia orgánica a metano y dióxido de carbono en ausencia de oxígeno, con una poca efectividad sobre la concentración de nutrientes como el nitrógeno.

En los sistemas de aspersión, a pesar de ser el sistema de tratamiento donde se da la mayor emisión de óxido nitroso, el dióxido de carbono es el gas que representa una mayor emisión. Este comportamiento está posiblemente relacionado a que en este STAR se

presenta un mayor intercambio entre el oxígeno del aire con el agua residual, y se vuelve más aerobio que otros sistemas como las lagunas. El dióxido de carbono es el producto preponderante en la digestión aerobia, según explica Diocaretz (2010), difiriendo de la digestión anaerobia donde se facilitan los procesos de metanogénesis y de nitrificación - desnitrificación.

Los factores de emisión de CO₂, CH₄ y N₂O para los nueve Beneficios muestreados se presentan en el Apéndice 41. Estos factores no son comparables con los que presenta el IMN, debido a que no se pueden presentar en relación con la DQO.

Los kilogramos de dióxido de carbono equivalente por fanega procesada (kg CO₂e/ff) obtenidos del producto de los factores de emisión de los distintos GEI y su potencial de calentamiento global (PCG) se muestran en la Figura 19.



Simbología: Laguna anaerobia = L; Reactor anaerobio = R, Aspersión = A.

Figura 17. Emisiones de dióxido de carbono equivalente por fanega procesada según los distintos STAR

Analizando los sistemas de manera integrada, se puede observar que la emisión de dióxido de carbono equivalente de los campos de aspersión fue menor que la de los otros tipos de STAR, lo que hace que esta tecnología sea una buena alternativa de tratamiento en comparada con las lagunas y los reactores anaerobios, basándose en las emisiones de GEI que genera.

Todos los Beneficios incluidos en este estudio desde la etapa de diagnóstico hasta la cuantificación de los GEI, presentaron una alta variabilidad en cuanto a las características de sus STAR, lo cual lleva a que cada resultado obtenido y cada factor de emisión calculado, sean únicos para cada Beneficio y no deben ser utilizados como factores de emisión para los restantes Beneficios de Costa Rica.

Esta variabilidad de los distintos STAR se puede observar con parámetros ambientales, como, por ejemplo, la temperatura ambiental que fue medida en todas las tomas de muestra de GEI, y que fue analizada mediante una correlación de Spearman como se muestra en el Cuadro 12.

Cuadro 12. Correlación de Spearman entre cada flujo de emisión y la temperatura ambiental del Beneficio Santa Rosa Ltda.

| Variable | Flujo de emisión | | |
|-------------|------------------|-----------------|------------------|
| | CH ₄ | CO ₂ | N ₂ O |
| Correlación | 0,131 | 0,187 | -0,016 |

| | | | |
|---------------------------|-------|-------|-------|
| Significancia estadística | 0,375 | 0,203 | 0,914 |
|---------------------------|-------|-------|-------|

El cuadro anterior muestra una correlación de Spearman entre cada flujo de emisión y la temperatura de muestreo para cada Beneficio, donde, en términos generales, no se identificó que existiera una correlación debido a que la significancia debe ser menor a 0,05 para que la correlación se considere aceptable con un 95% de confianza.

Por esta razón, se puede inferir que la temperatura ambiental no representó un factor que afectara las emisiones de GEI, a pesar de que cada una de las mediciones se realizó a dos temperaturas ambientales diferentes. Esto se puede deber a que al menos en los casos de lagunas y reactores, la temperatura ambiental no necesariamente representa las condiciones del agua residual.

Por ejemplo, en una laguna las emisiones se generan en el fondo, donde se da principalmente la degradación. De acuerdo con Olmos, citado por Sánchez, A (2015), la temperatura ambiental no representa la temperatura del agua, la cual puede ser mayor o menor en el interior del cuerpo de agua. La temperatura ambiental solo afecta la capa superficial del agua, perjudicando solo la solubilidad de los gases disueltos en las capas superiores.

4.3. Etapa III: Análisis de la viabilidad técnica, económica y ambiental de los STAR

4.3.1. Viabilidad técnica

La primera variable analizada en la matriz de viabilidad técnica es el Área requerida para el tratamiento de las aguas residuales del Beneficio. Respecto a esto, se determinó que el

campo de aspersión requiere más área que los otros sistemas, debido a que no se puede acumular como en una laguna, sino que se debe verter poco a poco, procurando que no se sature el terreno, por lo que para tratar la misma cantidad de agua, el campo de aspersión necesita más área superficial.

Muñoz (2011) señala que el requerimiento de área para el campo de aspersión es mayor que en otros sistemas y depende del caudal por disponer. Además, hay que tomar en cuenta que se necesita que el agua aspersada se infiltre totalmente sobre el área, sin presentarse encharcamientos.

En la Figura 20 se muestra la relación entre el área de emisión del STAR y la capacidad de procesamiento de café por cosecha para los Beneficios de café.

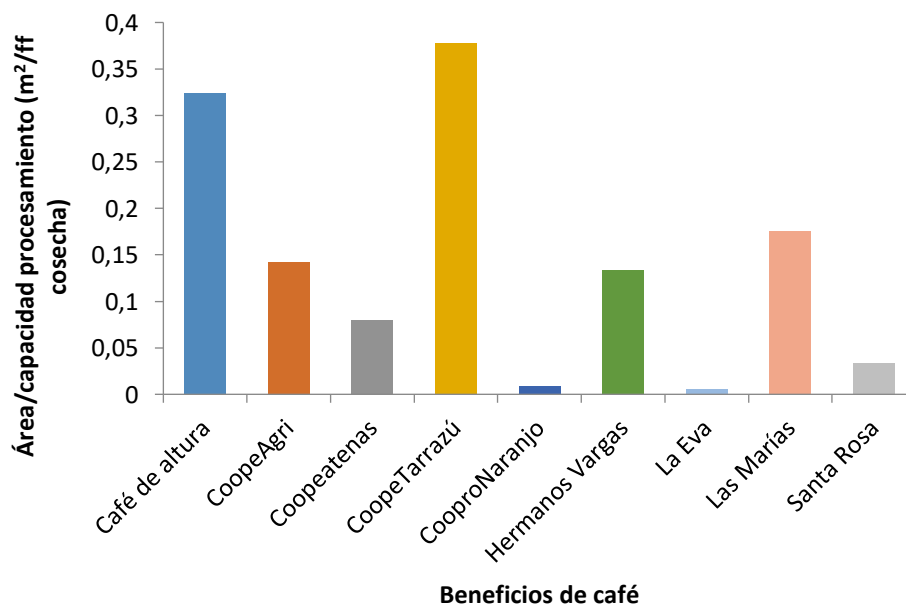


Figura 18. Coeficiente área de emisión del STAR/capacidad de procesamiento de café por cosecha

En la Figura 20 se observa cómo los Beneficios de aspersión, como lo son Café de Altura de San Ramón Especial, CoopeTarrazú R.L. y Las Marías, son los que utilizan mayor área de tratamiento por fanega de café procesado. Por el contrario, los sistemas con reactor anaerobio (CooproNaranja R.L. y La Eva) son los que poseen un menor coeficiente área/capacidad procesamiento, esto significa, que pueden tratar mayores cantidades de agua en menor espacio de tratamiento.

Respecto a la capacidad de procesamiento de los STAR, los Beneficios con sistema de tratamiento por aspersión, mostraron poseer una mayor capacidad instalada para el tratamiento de las aguas residuales, como se puede observar en la Figura 21.

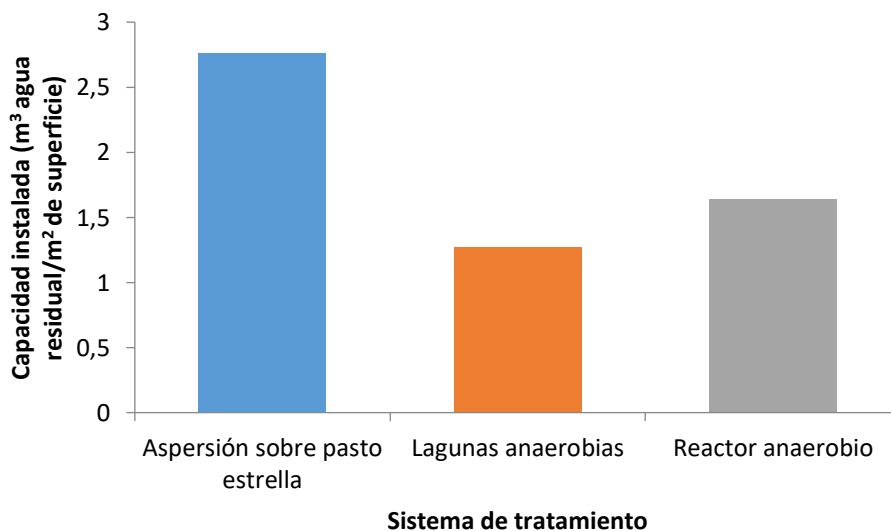


Figura 19. Promedio de la capacidad instalada de los STAR

En la Figura 21 se muestra que los sistemas de aspersión cuentan con una mayor capacidad instalada para tratamiento, cercana a los 3 m³ de agua residual por cada m² destinado para tratar estas aguas. Así también se puede notar que las lagunas son quienes tienen menor

capacidad de tratamiento, pudiendo tratar poco más de 1 m³ de agua residual por cada m² de área superficial del STAR.

Conocer la capacidad instalada de un STAR previo a su implementación, es de suma importancia para su diseño y construcción, ya que ambas variables están directamente relacionadas.

Además, cuando el sistema ya está instalado, no conocer la capacidad instalada puede generar no estar operando con las condiciones de diseño y por lo tanto sobrecargar o subutilizar el sistema, produciendo un mal funcionamiento de este. (Tejada *et al.* 2013).

Al analizar los diferentes sistemas con base en el nivel de tratamiento que realizan, se determina que todos mantienen la misma condición debido a que los tres sistemas estudiados alcanzan hasta un nivel secundario de depuración de las aguas. Este nivel, según Domínguez (2015), corresponde al grado donde se realiza una degradación de la materia orgánica en sólidos suspendidos que se eliminan fácilmente, esto posterior al asentamiento de sólidos realizado en el nivel primario. En el terciario se llevan a cabo procesos adicionales como la desinfección.

Esto sucede también con el método de aspersión sobre pasto estrella, ya que es un sistema de aplicación al terreno, donde el agua es filtrada por el pasto, el mantillo, la capa superficial del suelo y es reducida por oxidación biológica (Álvarez *et al.* 2002).

La eficiencia de remoción de un sistema de tratamiento es la relación entre la carga de contaminante de entrada al sistema y la carga de la salida (Gálvez 2013). Por esto es de suma importancia conocerla, para identificar si el STAR está trabajando de la forma correcta.

En la Figura 22 se muestran los porcentajes de eficiencia de remoción (%E) calculados para los reactores y las lagunas anaerobias.

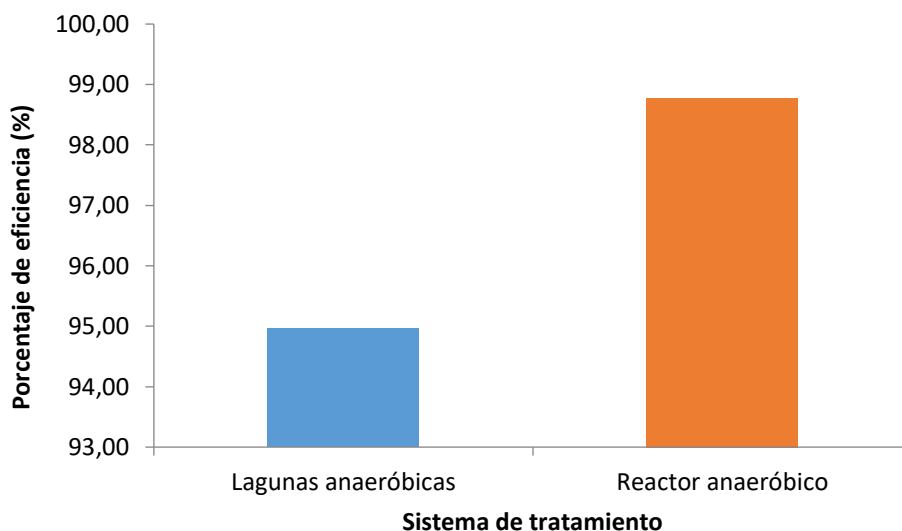


Figura 20. Porcentaje de eficiencia de remoción de lagunas anaerobias y reactor anaerobio

Como se observa en la Figura 22, según el análisis realizado, las lagunas anaerobias tienen un porcentaje de eficiencia de remoción menor que el del reactor anaerobio, con valores aproximados de 95% y 99% respectivamente.

En el caso del sistema de aspersión sobre pasto estrella, no se puede medir realmente la eficiencia de remoción, debido a que no existe un efluente donde se pueda comparar con la concentración de ingreso al sistema, pues como se mencionó, una parte del agua aspersada se infiltra y otra se evapora.

Respecto al manejo de los lodos que se generan en los STAR, se pudo determinar el porcentaje promedio del área donde es necesario extraer lodos, respecto al área total de emisión de cada sistema, como se puede observar en la Figura 23.

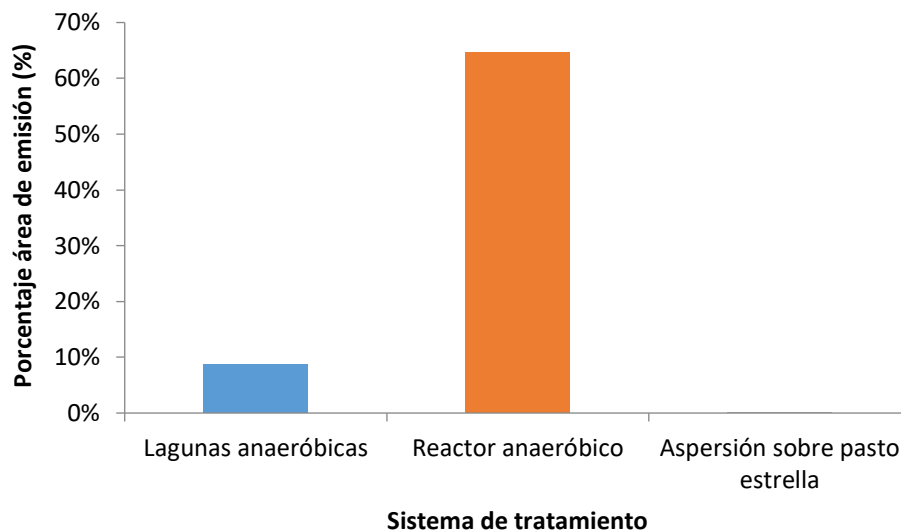


Figura 21. Porcentaje del área total de emisión de cada STAR, donde se necesita extracción de lodos, según los Beneficios evaluados

Como se puede notar en la Figura 23, son los reactores anaerobios quienes requieren extraer lodos de un mayor porcentaje del área de tratamiento, debido principalmente a que las unidades del sistema corresponden a “tanques” de cemento, los cuales en su mayoría deben ser limpiados completamente durante la época fuera de cosecha, para garantizar una mayor eficiencia en la temporada de procesamiento.

Por otra parte, el sistema de aspersión como tal se comporta como un lecho de lodos sobre el cual, según Chacón (2011), se forma una especie de “cama o colchón” de pasto, por lo que en este tipo de STAR no se retiran los lodos.

Otra de las variables a tomar en cuenta a la hora de decidirse por un STAR para Beneficios de café, es la flexibilidad ante los cambios de las características del afluente, ya que si el sistema tiene una alta sensibilidad, cuando ocurra un cambio mínimo en las condiciones fisicoquímicas del agua, la eficiencia de remoción puede disminuir significativamente con

la consecuencia de tener un vertido que no cumpla con los valores establecidos por la legislación.

De los STAR evaluados, el reactor anaerobio muestra ser el que presenta más sensibilidad ante los cambios del afluente, esto debido a que, según Jaubert (2004), en estos procesos reviste especial importancia el control de parámetros como temperatura, pH y nutrientes, para mantener las bacterias en las condiciones necesarias.

De hecho, los sistemas anaerobios en general son muy sensibles a las condiciones adversas de temperatura, pH y algunas sustancias, por lo que la aspersion sobre pasto estrella tiene ventaja sobre estos, ya que se trata de un sistema aeróbico.

Respecto a la replicabilidad de los sistemas de tratamiento, se determinó que ningún tipo tiene ventaja sobre otro, ya que en general todos son replicables, pero cada Beneficio cuenta con características de aguas residuales, de espacio y de topografía muy diversas, por lo que no se puede duplicar un sistema tal y como se ha implementado en otro lugar (Ulate 2017).

Por otra parte, el cumplimiento de la legislación ambiental es una de las variables calificadas por los expertos validadores, como una de las más importantes a la hora de tomar la decisión de instalar un tipo STAR para un Beneficio de café.

Respecto a esto, se pudo observar en los respectivos reportes operacionales aportados por los Beneficios, que los sistemas de lagunas anaerobias y reactores cumplían con los valores establecidos por el Reglamento de vertido y reúso de aguas residuales.

Sin embargo, en el caso de la aspersión sobre pasto estrella, la ausencia de un vertido evita que se puedan monitorear estos parámetros. En algunos casos las muestras se toman de los pozos de monitoreo que solicita el Ministerio de Salud para este tipo de STAR; no obstante (según lo presentado en los reportes operacionales), en ocasiones estos pozos no cuentan con agua, por lo que no es posible realizar la medición y esto no garantiza que no esté ocurriendo una percolación profunda o que el agua se esté infiltrando por otro sitio (Montero 2000).

El personal requerido para operar el STAR es otra de las variables a considerar, a la hora de decidirse por uno, ya que un sistema que no requiera supervisión a tiempo completo tiene ventaja sobre otros en los que se debe contar con una persona encargada exclusivamente de su operación. En la Figura 24 se muestran los porcentajes de personal exclusivo requerido o no requerido en los Beneficios.

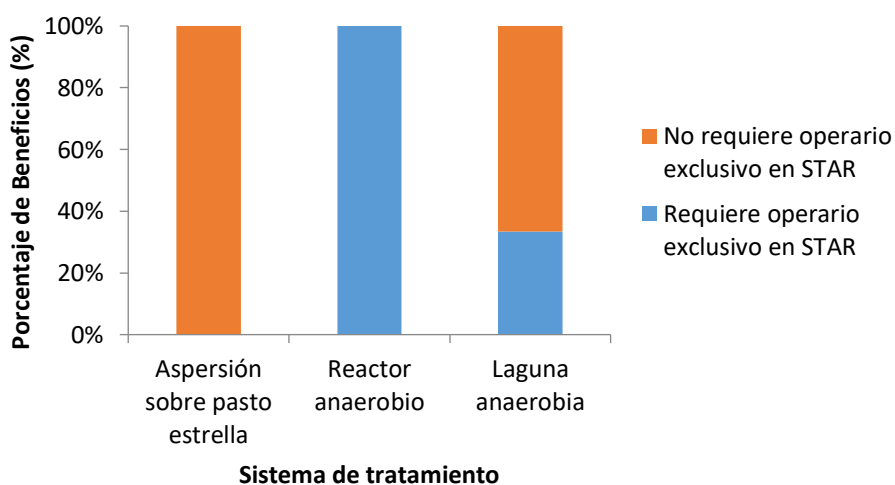


Figura 22. Porcentaje de Beneficios que requieren o no personal exclusivo en el STAR

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales en general no requieren de mucho personal que les pueda dar el mantenimiento y además los opere, generalmente se utiliza una sola persona para estas tareas; sin embargo, como se puede ver en la Figura 24, en algunos sistemas de lagunas (más de 30%) y en el 100% de los reactores anaerobios, se requiere que la persona esté la jornada completa dedicada a este trabajo. Esto no sucede con los campos de aspersión, donde, por el contrario, en el 100% de los casos la persona encargada de su operación se dedica también a otras tareas durante el día, ya que esta labor no le demanda todo el tiempo; esto sucede porque el sistema después de instalado se puede automatizar (Muñoz 2011).

Respecto a la duración del entrenamiento para operar los STAR, se encontró que un sistema de aspersión requiere poca capacitación ya que su operación es sencilla. No sucede así con los otros sistemas como reactores o lagunas anaerobias que requieren de una capacitación más extensa y profunda para poder operar adecuadamente el sistema, y atender los problemas que se pueden presentar, como se observa en la Figura 25.

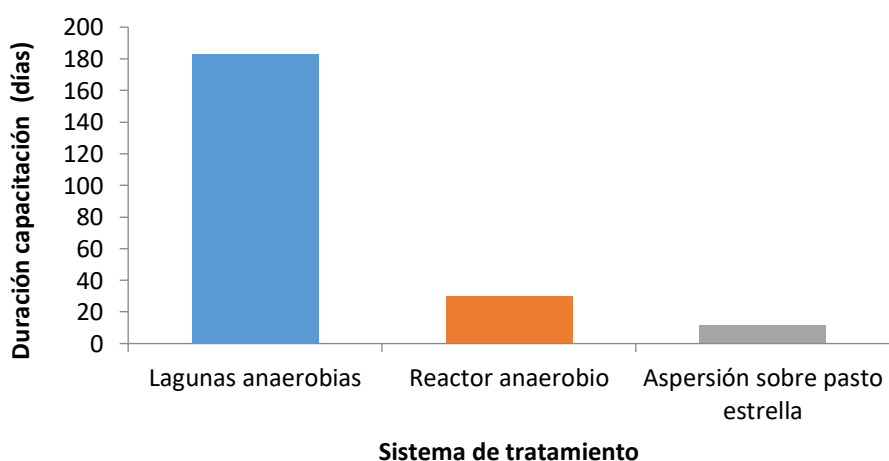


Figura 23. Promedio de la duración de la capacitación para operar los principales sistemas de tratamiento de aguas residuales de Beneficio de café

En la Figura 25 se puede notar que las lagunas anaerobias son las que requieren una capacitación más prolongada, mostrando un promedio de 183 días; por el contrario, los reactores anaerobios y los campos de aspersión presentan duraciones promedio mucho más bajas, de 30 y 12 días respectivamente.

Según Jaubert (2004) y Korsak (2010), la eficiencia de tratamiento, en términos de remoción de materia orgánica, está en función principalmente del tiempo de retención hidráulica, por esto es de suma importancia conocerlo y diseñar el sistema de acuerdo con la eficiencia buscada.

Los STAR estudiados mostraron diferentes tiempos de retención hidráulica, como se muestran a continuación en la Figura 26.

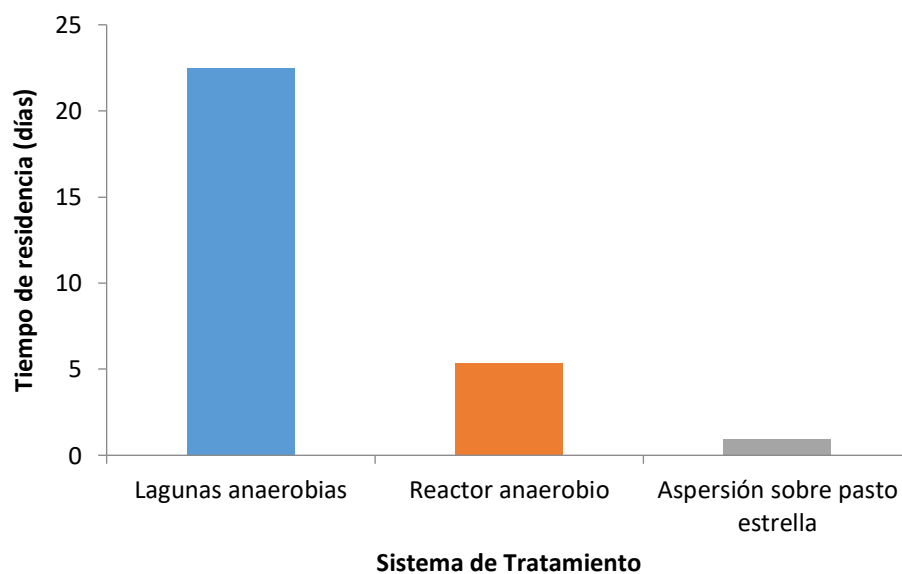


Figura 24. Promedio del tiempo de retención hidráulica de los diferentes STAR de los Beneficios estudiados.

Como se muestra en la Figura 26, las lagunas anaerobias presentan los mayores tiempos de retención, cercanos a los 25 días; a diferencia de los reactores anaerobios y aspersión sobre pasto estrella, los cuales presentan tiempos de retención muchos menores.

Esto coincide con lo presentado por Mercado (2013), quien menciona que las lagunas anaerobias suelen tener largos períodos de retención hidráulica y que esto contribuye a la remoción de patógenos, permitiendo la sedimentación de huevos de helmintos y la mortalidad de bacterias, siendo contrario a los reactores anaerobios, en quienes -según Lorenzo y Obaya (2006)- se busca que el tiempo de retención hidráulica sea el menor posible.

En cuanto a los sistemas de aspersión sobre pasto estrella, al consistir en un método de infiltración, el tiempo que se mantiene el agua sobre el terreno es mínimo. Esto se logra calculando la cantidad de agua necesaria y la frecuencia de aspersión, a partir principalmente del área disponible y la permeabilidad del suelo; para así evitar la anegación del suelo (Muñoz 2011).

Otra de las variables tomadas en cuenta a la hora de instalar un STAR, es la facilidad de mantener las características fisicoquímicas y biológicas necesarias para el sistema. A partir de la información brindada por cada Beneficio, se pudo determinar las características que se deben controlar según el tipo de STAR para garantizar la eficiencia, las cuales se muestran en el Cuadro 13.

Cuadro 13. Características fisicoquímicas y biológicas que deben ser controladas en los STAR analizados

| Control | Tipo de STAR | | |
|---------------------|--------------------------------|-------------------|--------------------|
| | Aspersión sobre pasto estrella | Reactor anaerobio | Lagunas anaerobias |
| Tamizado aguas | F | - | - |
| Tiempo riego | F | - | - |
| Sólidos suspendidos | - | F | - |
| Temperatura | - | F | - |
| Caudal | - | F | - |
| Microorganismos | - | B | B |
| pH | - | Q | Q |
| DQO | - | Q | Q |
| DBO | - | - | Q |

Fuente: Elaborado a partir de cuestionario sobre datos técnicos, económicos y ambientales de los STAR. Simbología: F: Característica física, B: Característica biológica, Q: Característica química, (-): No aplica.

En el Cuadro 13 se observa que el campo de aspersión requiere controlar únicamente características físicas, como lo son el tamizado de las aguas de entrada y el tiempo de riego, lo que lo hace un sistema más fácil de manejar, especialmente si se logra optimizar (Muñoz 2011). Por el contrario, los reactores y las lagunas anaerobias necesitan contemplar, además, una vigilancia sobre parámetros biológicos y químicos, como el DQO, DBO y microorganismos, los cuales, según Crombet *et al.* (2016), son más difíciles de controlar que los físicos.

Finalmente, como resultado de los análisis realizados y de las puntuaciones asignadas, respecto a la viabilidad técnica el sistema de lagunas anaerobias obtuvo 43,7%, los

reactores anaerobios, 45,7% y aspersión sobre pasto estrella, 48%, los cuales se muestran en la Matriz de viabilidad que se presenta en el Apéndice 45.

4.3.2. Viabilidad económica

Según los expertos consultados para la validación de variables (ver apéndice 44), cuando se determina la viabilidad económica de todo STAR, una de las principales características que se consideran y que tienen gran peso a la hora de tomar una decisión es el costo de construcción e implementación.

En este caso, los costos de construcción de los STAR varían de un Beneficio a otro, de manera significativa, inclusive cuando pertenecen a un mismo tipo de sistema, como se puede observar en la Figura 27.

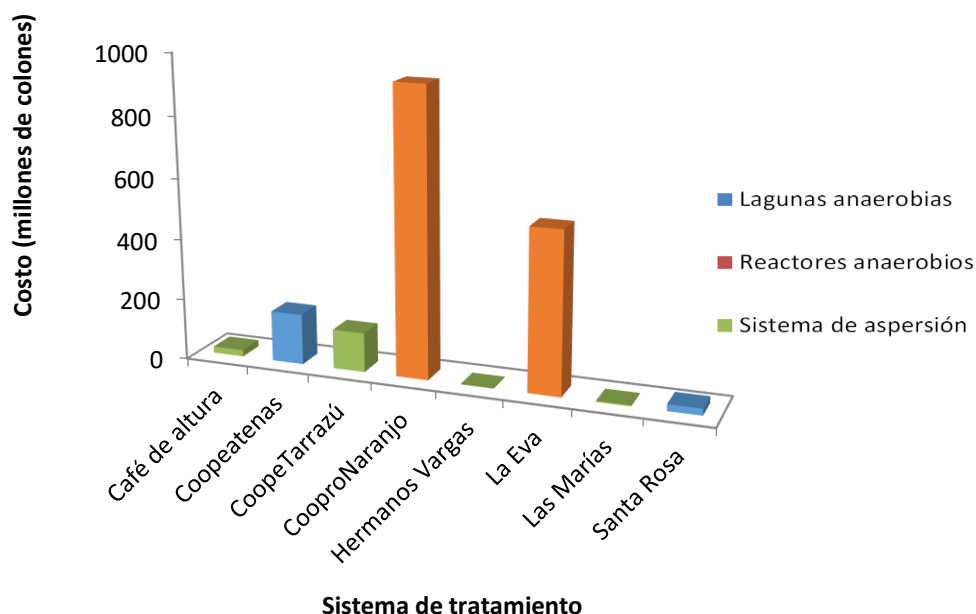
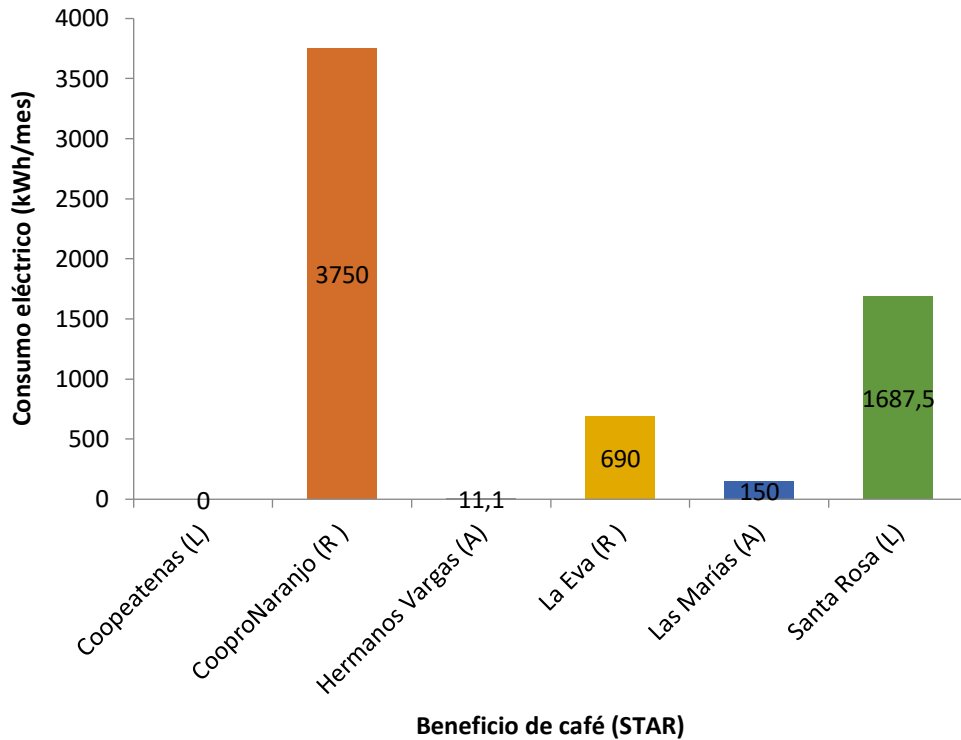


Figura 25. Costo de construcción e implementación de los STAR, en cada Beneficio analizado

En la Figura 27 se observa que, a pesar de una diferencia de hasta 400 millones de colones en el costo de construcción entre los STAR de los Beneficios con reactor anaerobio, de igual forma este sistema representa una mayor inversión que las lagunas o aspersión. Así lo reafirma Jaubert (2004), quien menciona que en comparación con un sistema lagunar, el reactor RAFA tiene una inversión inicial muy superior; sin embargo, los beneficios en cuanto al tratamiento y reducción del espacio físico del Beneficio son mayores.

Se puede notar, además, que los sistemas de aspersión, conforme con lo mencionado por la UTPL (2010), presentan un menor costo de construcción, comparado con los sistemas convencionales de tratamiento de aguas residuales.

El costo por consumo energético es otra de las variables consideradas como de mayor importancia en cuanto a la elección de un tipo de STAR. Estos datos también varían ampliamente de un Beneficio a otro del mismo sistema, como se muestra en la Figura 28.



Simbología: (L): Lagunas anaerobias, (R): Reactor anaerobio, (A): Aspersión sobre pasto estrella.

Figura 26. Consumo eléctrico de los STAR pertenecientes a los Beneficios de café analizados.

En la Figura 28 se puede observar los consumos eléctricos de los STAR reportados por los Beneficios, donde Beneficios como La Eva S.A. y Coopronaranjo R.L., a pesar de contar con el mismo sistema, presentan consumos muy diferentes (de hasta 2000 kWh/mes). Cabe destacar que algunos de estos Beneficios no cuentan con el dato de consumo perteneciente únicamente al STAR y por esta razón no se muestran en el gráfico.

A partir de esta información, se elaboró el promedio de consumo eléctrico por STAR, el cual se muestra en la Figura 29.

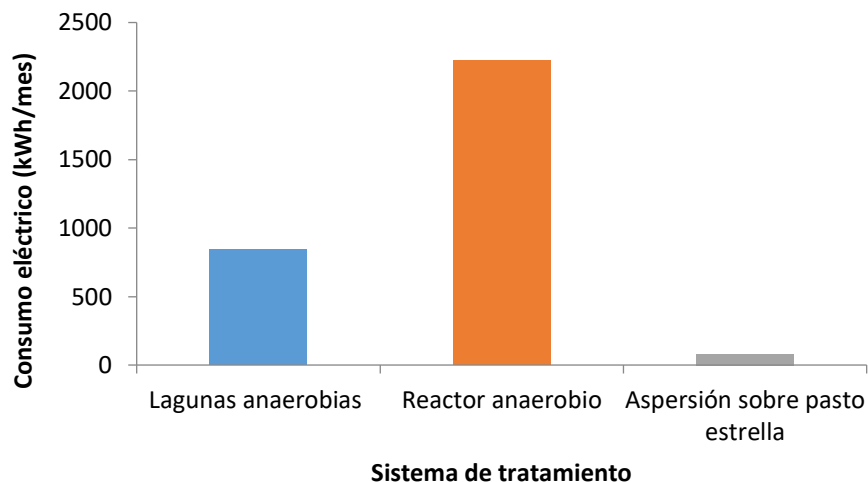


Figura 27. Consumo eléctrico promedio de los STAR estudiados

Como se muestra en la Figura 29, los reactores anaerobios son los que presentan un mayor consumo energético (cerca de los 2500 kWh/mes), mientras que la aspersión sobre pasto estrella es el sistema de mayor ahorro de energía (80 kWh/mes) debido a que estos últimos solo utilizan electricidad para trasladar sus aguas del Beneficio al sistema de tratamiento. Esto concuerda con lo mencionado por Moreno *et al.* (2003), quienes indican que los métodos de tratamiento en el terreno se caracterizan, entre otras cualidades, por sus menores necesidades de consumo energético.

Por otra parte, de acuerdo con Sánchez *et al.* (2016), las aguas residuales generadas en el Beneficio traen impurezas que deben ser removidas para mejorar el funcionamiento del sistema de tratamiento y evitar la obstrucción al paso del agua. Esto se realiza por medio un tamiz, normalmente el lugar correcto para colocarlo es al final del caño de lavado o a la entrada del sistema de tratamiento.

Sin embargo, hay sistemas en los que no es estrictamente necesario contar con esta etapa de tratamiento, por ejemplo, las lagunas de gran área superficial y con gran capacidad

instalada. Esto no sucede con los reactores anaerobios, en los que, según Cortez *et al.* (2017), para asegurarles una operación óptima, se debe incluir un desbaste riguroso de finos con un paso máximo de 10 mm, precedido de un desbaste de gruesos.

En este aspecto, los campos de aspersión estrictamente deben incurrir en los gastos que conlleven la instalación y el uso de un tamizado de las aguas, debido a que esto es uno de los requisitos establecidos por el Ministerio de Salud, para poder otorgar el permiso de operación de este STAR.

Además del costo de construcción e implementación, el de consumo eléctrico y el de pretratamiento de las aguas, otra variable importante para la elección de un STAR es el costo asociado al pago de los salarios del personal que opera el sistema. En la Figura 30 se muestra el promedio de los salarios de los encargados de los sistemas de tratamiento, reportados en el cuestionario sobre datos técnicos, económicos y ambientales de los STAR.

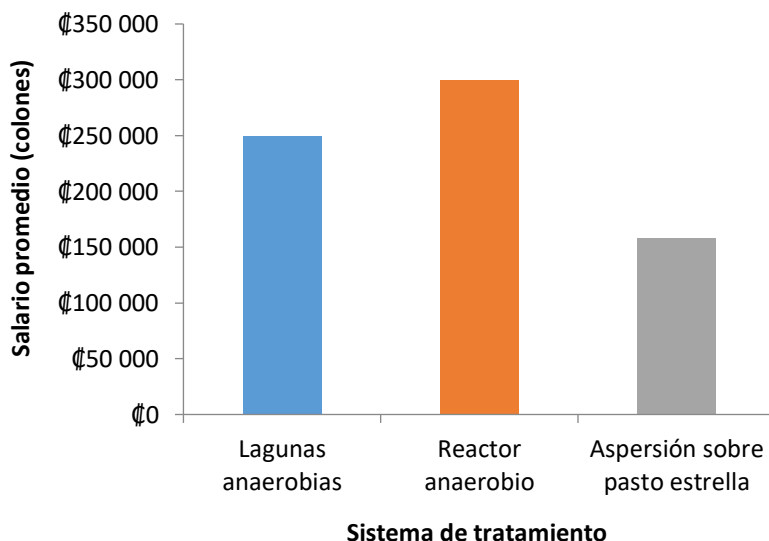


Figura 28. Salario promedio de los operarios de los STAR en los Beneficios de café analizados

En la Figura 30 se muestran los salarios promedios de quienes se encargan de operar los sistemas de tratamiento de aguas residuales de los Beneficios de café participantes en el estudio.

Se puede notar que los reactores anaerobios son los que representan el sistema de mayor costo de salarios (alrededor de 300 000 colones por operario); mientras que los campos de aspersión sobre pasto estrella, rondan los 150 000 colones y representan, por lo tanto, un menor costo en sueldos. Esto se debe principalmente a que -como se mencionó con anterioridad- este tipo de sistema se puede automatizar y cuenta con la ventaja de poseer pocos parámetros que se deban estar controlando durante su aplicación.

Por otra parte, el costo de mantenimiento de un STAR es un factor que se debe contemplar a la hora de tomar la decisión de instalar uno. En este sentido, el costo varía de acuerdo con el tamaño del sistema, que a su vez depende de la producción de café, por esta razón se decidió expresar el costo de mantenimiento en colones por fanega procesada. En la Figura 31 se muestran los resultados de esta variable.

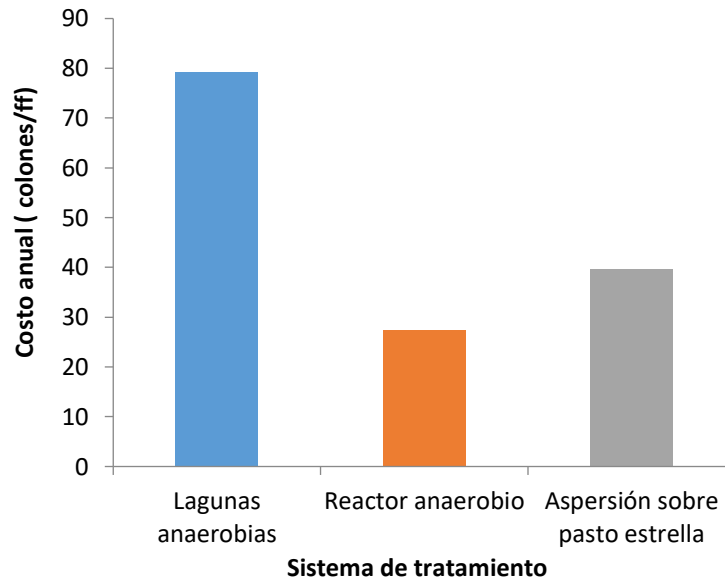


Figura 29. Promedio del costo anual de mantenimiento de los STAR pertenecientes a los Beneficios estudiados, expresado en colones/ff

En la Figura 31 se muestra el costo promedio por año correspondiente al mantenimiento de los STAR analizados. En ésta se puede observar que el sistema de mayor costo son las lagunas anaerobias, con un gasto promedio de 80 colones por fanega procesada. Por el contrario, los reactores anaerobios muestran ser el sistema de menor gasto en mantenimiento, con aproximadamente 30 colones por fanega procesada.

Estos resultados se deben a que, en el caso de las lagunas, se requiere una limpieza periódica de las unidades; y en la mayoría de los casos, es necesaria la adición de nutrientes o alcalinizantes ya que el proceso anaerobio es sensible al pH (Jaubert 2004).

En contraparte, experiencias como la de Morgan (2001) muestran que el reactor anaerobio de flujo ascendente mantiene costos relativamente bajos de mantenimiento, ya que no posee requerimientos de otro equipo electromecánico más que la bomba de alimentación, ni de

equipo para el control de su operación. Los resultados que se presentan en esta investigación muestran un dato mucho menor que el presentado en el 2004 por Jaubert, quien determinó costos por mantenimiento del reactor por aproximadamente 270 colones por fanega procesada, mostrando una diferencia de hasta 900%.

En el caso de la aspersión se lleva a cabo un gasto intermedio de mantenimiento de 40 colones por fanega procesada, y dicho costo se atribuye principalmente a las grandes extensiones requeridas para tratar las aguas mieles y así evitar la saturación del suelo. En este tipo de sistemas, como se menciona en la Guía para la Selección de Tecnologías de Depuración de Aguas Residuales por Métodos Naturales, de la Universidad Técnica Particular de Loja (2010), existen tuberías en toda el área de tratamiento, las cuales se deben estar vigilando para evitar fugas y atascamientos tanto en ellas como en las palomillas de aspersión.

Para el análisis de la viabilidad económica se evaluó también la existencia o no de beneficios económicos con la implementación de un STAR. En este sentido, una ventaja de los sistemas de reactor anaerobio es que en sí son un proceso generador de energía (productor de CH_4), en lugar de consumidor energético, como la mayoría de los procesos de depuración de aguas residuales (Morgan 2001). Este sistema está adaptado para la recolección de gases de combustión, cuya utilización en las labores diarias del STAR, puede ayudar a reducir el gasto por compra de energía.

Por otro lado, según Peters (2009), el uso del campo de aspersión, por orden del Ministerio de Salud, requiere disminución del consumo de agua con el objetivo de que las aguas mieles se comporten como lodos, lo que genera reducción del costo de este servicio; sin

embargo, considerando que muchos de los Beneficios toman el agua de pozos o ríos, este no es un factor que pueda considerarse de alta importancia.

Finalmente, como resultado de los análisis realizados y de las puntuaciones asignadas, respecto a la viabilidad económica el sistema de lagunas anaerobias obtuvo 20,8%, los reactores anaerobios 17,7% y aspersión sobre pasto estrella 27,2%, lo cual se muestra en la Matriz de viabilidad que se presenta en el Apéndice 45.

4.3.3. Viabilidad ambiental

Para el análisis de la viabilidad ambiental se evaluaron las siguientes variables: Ahorro de combustibles fósiles, posibles impactos ambientales, atracción de vectores de enfermedades, eficiencia en el uso del recurso hídrico, entorno ecológico, emisión de GEI y efluente del tratamiento.

Respecto al ahorro de combustibles fósiles, es importante mencionar que los sistemas de reactores anaerobios tienen la ventaja en esta variable, debido a que, como se mencionó, en ellos se destaca la producción de biogás como producto final, el cual puede ser explotado como una fuente de energía renovable y reducir así el uso de combustibles fósiles (Rosenkranz 2013). De hecho, en los casos de los Beneficios estudiados que contaban con reactor anaerobio, este biogás es utilizado para el proceso de secado del café y para mantener la temperatura del agua en los niveles necesarios para los microorganismos.

Los posibles impactos ambientales del STAR son otra de las variables analizadas. En este caso se evaluó la potencial contaminación de aguas superficiales y subterráneas, ya que es uno de los principales problemas ambientales que suelen presentar los STAR. Las emisiones de GEI a la atmósfera se abarcan más adelante.

Según Molina y Villatoro (2006), en las lagunas anaerobias la infiltración es un problema muy común, debido a que en algunos casos los altos costos de impermeabilización provocan que esta sea inadecuada o inexistente. Si esto llega a suceder se pueden ocasionar problemas de contaminación de agua subterránea y mantos acuíferos (Jaubert 2004).

Respecto a los campos de aspersión sobre pasto estrella, la UTPL (2010) menciona que el suelo como medio depurador elimina los contaminantes del agua residuales; sin embargo, la descontaminación del agua por métodos naturales puede producir efectos o impactos indeseables sobre el suelo.

En este tipo de sistema, debido a que las aguas residuales son aplicadas directamente sobre el terreno, existe un alto riesgo de contaminación de acuífero cuando el nivel freático es cercano a la superficie. Este es un punto importante de considerar, debido a que en Costa Rica los niveles freáticos suelen ser muy altos, entre tres y diez metros de la superficie (Jaubert 2004). Además, si existen altas pendientes, se podrían contaminar aguas superficiales debido a la posible ocurrencia de escorrentía.

Para evitar esto, el Ministerio de Salud exige ciertas características que debe cumplir cada sistema de campo de aspersión sobre pasto estrella, para otorgarle el permiso de operación. Entre estos requisitos se encuentran los siguientes estudios: Hidrogeología y geotecnia del área propuesta, hidrogeología del área por ser impactada, estudio de flujo de agua en medio poroso realizado por un especialista en riego, plano topográfico que incluya curvas de nivel del terreno por utilizar. Además, en caso de no encontrarse el nivel freático a menos de 6 m de profundidad, el Ministerio de Salud aceptará la presentación de un estudio de tránsito de

contaminantes para DBO, que incluya que no existe posibilidad de contaminación de los acuíferos (Peters 2009).

Respecto a esto, Chacón (2011) en su ponencia “Sistema de tratamiento de las aguas residuales del Beneficiado por Aspersión sobre Pasto Estrella” menciona que los estudios realizados indican que no se han producido efectos adversos en cuerpos de agua cercanos ni en acuíferos. Los tiempos de tránsito de contaminantes realizados como parte de los estudios hidrogeológicos también muestran valores favorables que previenen la contaminación bacteriana de eventuales acuíferos.

En los reactores anaerobios no se ha encontrado evidencia de que presente alto peligro de contaminación de aguas subterráneas o superficiales, debido a que la mayoría se encuentran construidos con material de cemento y sobre la superficie.

En otro tema, el funcionamiento inadecuado de todo sistema de tratamiento genera inconvenientes en el proceso de depuración, como malos olores; debido a estas causas puede existir producción de mosquitos, moscas y otros insectos portadores de enfermedades.

En las lagunas, esto suele suceder especialmente durante su etapa inicial de operaciones, porque la actividad microbiana todavía no ha logrado a su eficiencia óptima (Mercado 2013). En el caso de los reactores anaerobios, estos suelen presentar olores debido al escape de gases (Torres 2012).

Sin embargo, durante la investigación, vectores como moscas fueron detectadas únicamente en los sistemas de aspersión, en donde se pudo percibir un olor menos ácido que en los

sistemas anaerobios. De hecho, se pudo observar que los Beneficios que poseen estos sistemas, se ven forzados a utilizar productos para ahuyentar o eliminar estos insectos, como *Stomoxys* y malla perimetral con atrayentes e insecticida en algunos casos. En otros se busca su eliminación con controles biológicos utilizando *Spalangia* spp.

Esto se da ya que, de acuerdo con Molina y Villatoro (2006), las aguas mieles sin tratar atraen criaderos de moscas y otros insectos por sus contenidos de azúcar. Por otro lado, en las aguas tratadas anaeróbicamente los azúcares han sido fermentados y han dado lugar a productos como acetato, hidrógeno y dióxido de carbono, por lo que ya no son tan atractivas para insectos como las moscas.

Respecto al tema de ahorro del recurso hídrico, es importante mencionar que los campos de aspersión mostraron ser el sistema que de forma directa promueve la disminución del uso del agua. Esto se debe a que, como se mencionó anteriormente, el sistema como requisito para su utilización demanda la disminución de aguas residuales generadas, esto para evitar una saturación y anegación del suelo, que disminuiría la eficiencia de remoción de carga orgánica (Peters 2009, Caso 2003 y Muñoz 2011).

Por el contrario, se pudo observar que sistemas como el reactor anaerobio y algunas lagunas necesitan un volumen mínimo de agua para poder operar, lo que significa que aunque la cosecha sea poca y la producción de agua residual sea baja, deben agregar agua limpia al STAR para poder cumplir con los niveles mínimos de operación, lo que más bien genera un consumo extra del recurso (Chacón 2011).

Lo anterior se ve reflejado en la Figura 32, donde se muestra el consumo promedio de agua de los diversos Beneficios que participaron en el proyecto.

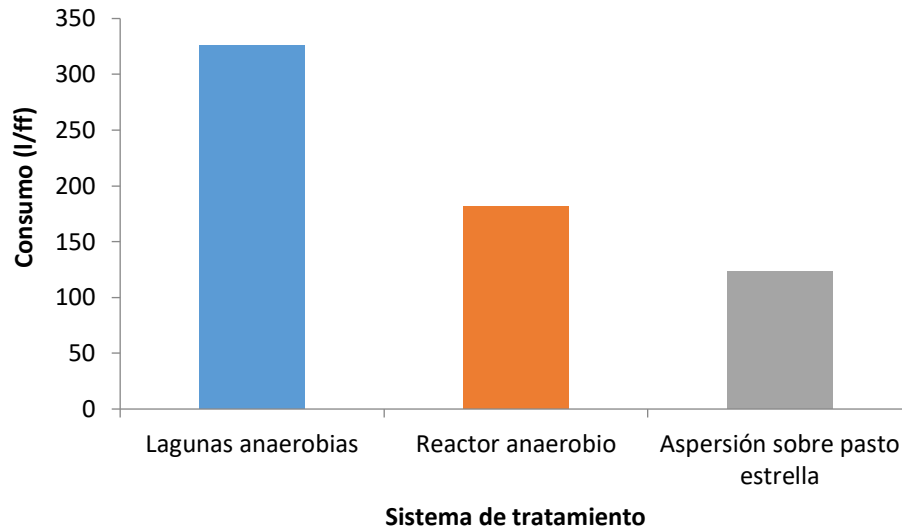


Figura 30. Consumo promedio de agua de los Beneficios participantes, asociado al tipo de STAR instalado

De acuerdo con la Figura 32, los Beneficios que poseen las lagunas anaerobias son los que generan un mayor consumo hídrico, con valores cercanos a los 320 l/ff. Los reactores anaerobios por su parte tienen un consumo intermedio, rondando los 200 l/ff; mientras que los Beneficios con campos de aspersión sobre pasto estrella, con un consumo cercano a los 120 l/ff, son los sistemas con un menor consumo de agua.

En otro tema, en la Guía para la Selección de Tecnologías de Depuración de Aguas Residuales por Métodos Naturales, de la Universidad Técnica Particular de Loja (2010) se menciona que la integración con el entorno evalúa la parte estética y el carácter paisajístico del sistema, que no debe afectar el entorno natural, por lo que al momento de implantarla se debe tener especial cuidado de no afectar el paisaje.

En este sentido, de acuerdo a lo observado y según lo mencionado por Chacón (2011), el sistema de aspersión sobre pasto estrella genera un efecto selectivo en la vegetación que

provoca que sólo sobreviva este pasto, por lo que los árboles y demás vegetación dentro del campo mueren.

Por el contrario, en los Beneficios con lagunas, se encontró un paisaje visualmente más sano, donde las lagunas servían para atraer fauna como garzas, patos y pájaros de diversas especies, además este tipo de STAR permite sembrar árboles y plantas que logran volver el ambiente más agradable.

En el caso de los reactores anaerobios visitados, al ser una edificación menos natural, no se cuenta con la presencia de tanta fauna como en las lagunas; sin embargo, debido a que el espacio que utilizan es de área reducida, el impacto paisajístico no es considerado importante (López 2009).

Una de las variables calificadas con mayor importancia en la viabilidad ambiental, al igual que los posibles impactos ambientales a los cuerpos de agua, es la de la emisión de GEI a la atmósfera proveniente del tratamiento de las aguas residuales del Beneficiado.

En el apartado 4.2 se analizan detalladamente las emisiones de GEI de los STAR generadas por cada gas para cada Beneficio participante del proyecto en la etapa de análisis de GEI. Para el análisis esta variable, las emisiones se expresaron en kilogramos de dióxido de carbono equivalente por fanega procesada ($\text{kg CO}_2\text{e/ff}$), para poder compararlas en forma general de acuerdo con lo producido entre los sistemas. Conforme a esto, en la Figura 33 se muestran las emisiones de GEI generadas por los diversos STAR.

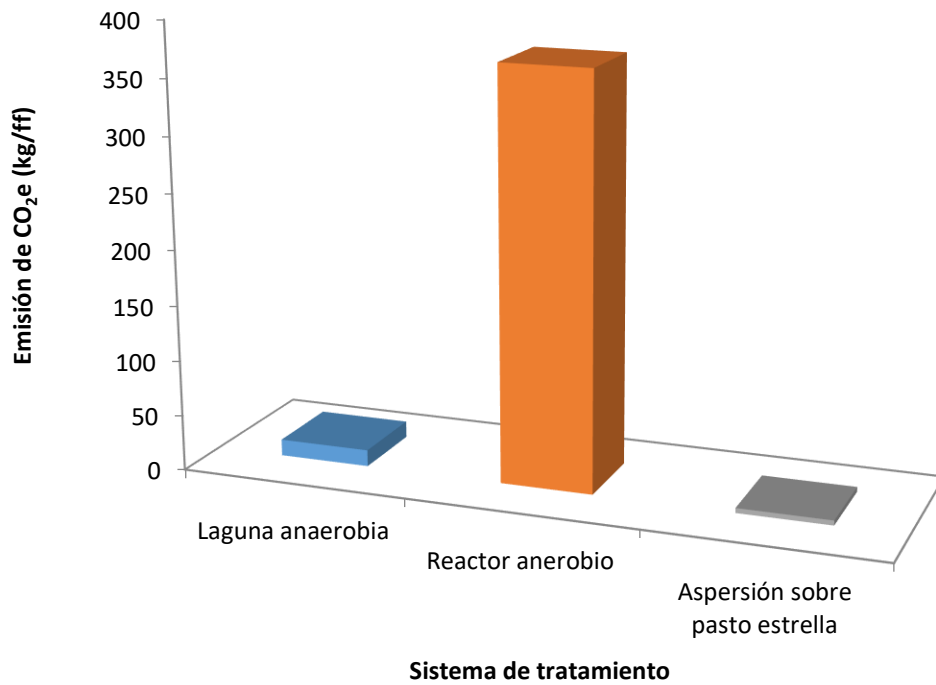


Figura 31. Promedio de las emisiones de CO₂e/ff de los sistemas de laguna anaerobia, reactor anaerobio y aspersión sobre pasto estrella, pertenecientes a los Beneficios participantes del estudio.

Es importante notar que la Figura 33 muestra que los reactores anaerobios generan una mayor emisión de CO₂e, que es aproximada a 400 kg CO₂e/ff. Se observa, además, que muy por debajo de este dato se encuentran las emisiones de lagunas anaerobias y aspersión; pero con el objetivo de lograr una mejor apreciación de la escala, en la Figura 34 se presenta esta gráfica sin los datos de los reactores.

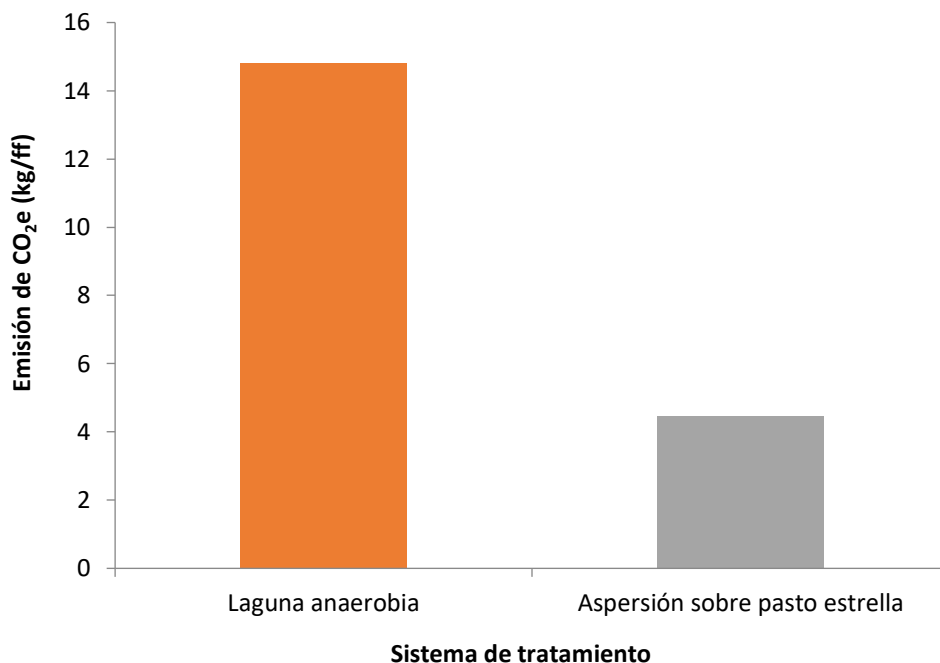


Figura 32. Promedio de las emisiones de CO₂e/ff de los sistemas de laguna anaerobia y aspersión sobre pasto estrella, pertenecientes a los Beneficios participantes del estudio

En la Figura 34 se denota una diferencia entre las emisiones generadas por los sistemas de lagunaje y los de aspersión, donde las lagunas presentan datos cercanos a 14 kg CO₂e/ff y aspersión sobre pasto estrella se muestra cercano a los 4 kg CO₂e/ff.

Las razones de los resultados que se presentan en las Figuras 33 y 34, son principalmente que los campos de aspersión presentan condiciones aerobias que promueven una mayor generación de dióxido de carbono en comparación con la generación de metano, el cual tiene un PCG global mucho mayor que el CO₂, por lo que los procesos anaerobios producen, aparte de CO₂, grandes cantidades de CH₄ (Arenas 2015).

El efluente del STAR es la última variable que se analizó para determinar la viabilidad ambiental de los sistemas. Según Chacón (2011), el sistema de aspersión sobre pasto

estrella, no genera vertido, ya que el agua es aspersada sobre el terreno, una parte se infiltra y otra se evapora. Este concepto de depuración en la actualidad es conocido como “vertido de contaminación cero” o “vertido cero” (Caso 2003).

Esto presenta una ventaja ya que no se produce contaminación directa a los cuerpos de agua, siempre tomando en cuenta que se deben realizar los estudios de suelos correspondientes, ya que como indica Muñoz (2011) un sistema de aspersión es un sistema planeado exclusivamente para un área determinada. Además, deben ser fiscalizados periódicamente para asegurarse de que cumplan con los requisitos dictados por el Ministerio de Salud.

Esta ausencia de vertido no se da en los otros tipos de sistemas analizados, donde sí hay presencia de este (como se puede ver en los diagramas de flujo de los STAR que se encuentran en la información recopilada dentro de los Apéndices de la sección 7.2 a la 7.10), que generalmente va directo a una quebrada o río.

Finalmente, como resultado de los análisis realizados y de las puntuaciones asignadas respecto a la viabilidad ambiental -las cuales se muestran en la Matriz de viabilidad que se presenta en el Apéndice 45- el sistema de lagunas anaerobias obtuvo 31,7 puntos relativos, los reactores anaerobios 31,8 puntos y aspersión sobre pasto estrella 30,5 puntos, lo que muestra que los tres sistemas se encuentran en una situación competitiva respecto a este tipo de viabilidad y que el reciente campo de aspersión sobre pasto estrella es equiparable con los sistemas convencionales de tratamiento de aguas.

De manera general, se sumaron los puntajes relativos obtenidos en cada etapa de viabilidad y se encontró que las lagunas alcanzaron 96,1 puntos; los reactores anaerobios, 100,4 y el

campo de aspersión sobre pasto estrella 111,5, obteniendo una viabilidad ligeramente más alta en el STAR por aspersión, con una diferencia de once puntos del sistema con puntuación más cercana (el reactor).

Para terminar, es importante mencionar que como señalan Lorenzo y Obaya (2006), ninguna de estas tecnologías es definitivamente mejor que las otras. Cada una tiene sus ventajas y desventajas en cuanto a costos de construcción, operación, uso de energía, tamaño, facilidad de operación, estabilidad, eficiencia, factores ambientales, entre otras; lo esencial es definir los requerimientos del caso y elegir el sistema que más se ajuste a ellas.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- Más del 40% de los beneficios de café estudiados no conocen la capacidad instalada de sus sistemas y a su vez no analizan las aguas residuales afluentes al sistema, lo que ocasiona que no se tomen las medidas necesarias para evitar un daño ambiental, que no se conozca la eficiencia del sistema y se pueda estar sobresaturándolo o más bien sub-utilizándolo.
- Más del 50% de los Beneficios diagnosticados poseen sistemas de lagunas anaerobias y de reactores anaerobios, de los cuales el más del 35% cumplen con los parámetros del RVRAR (Reglamento de vertido y reúso de aguas residuales N° 33601); los cuales demuestran realizar esfuerzos por mantener estos sistemas en buenas condiciones y que se mantengan en adecuado funcionamiento.

- Los sistemas de aspersión sobre pasto estrella no presentan el olor característico de los sistemas convencionales de tratamiento anaerobio, no generan vertido y su utilización genera una reducción del consumo hídrico.
- La ausencia de conocimiento técnico, la implementación y uso inadecuados del sistema de aspersión sobre pasto estrella pueden dar lugar a problemas de contaminación en aguas subterráneas y superficiales.
- El factor de emisión promedio de metano de los reactores anaerobios analizados es de 16,7 kg CH₄/ff, el cual es mayor a los presentados por las lagunas anaerobias y el campo de aspersión sobre pasto estrella, quienes emiten un promedio de 0,7 kg CH₄/ff y 0,1 kg CH₄/ff respectivamente.
- El factor de emisión promedio de dióxido de carbono de los reactores anaerobios analizados es 18,0 kg CO₂/ff, el cual es mayor a los presentados por las lagunas anaerobias y el campo de aspersión sobre pasto estrella, quienes emiten un promedio de 0,9 kg CO₂/ff y 0,8 kg CO₂/ff, respectivamente.
- Los campos de aspersión estudiados en promedio emiten más óxido nitroso (5022,4 mg N₂O/ff) que las lagunas y reactores anaerobios, quienes muestran promedios de 14,8 mg N₂O/ff y 1372,8 mg N₂O/ff. Sin embargo, estos se emiten en una magnitud menor que el metano y el dióxido de carbono.
- Los campos de aspersión sobre pasto estrella son el STAR de menor emisión de GEI, comparado en términos de CO₂e, los cuales presentan un promedio de 4 kg CO₂e/ff, mostrando diferencias con los 14 kg CO₂e/ff y 400 kg CO₂e/ff que generan las lagunas y reactores anaerobios respectivamente.

- La aspersión sobre pasto estrella es el sistema con una mayor viabilidad técnica, debido a su capacidad de tratamiento, su flexibilidad ante los cambios en las características del afluente, su nula necesidad de manejo de lodos, el bajo requerimiento de personal y la fácil capacitación.
- El sistema de aspersión posee una mayor viabilidad económica, debido principalmente a su bajo costo de construcción e implementación, bajo consumo energético y el bajo costo asociado al personal encargado del sistema.
- La viabilidad ambiental que presenta el sistema de aspersión sobre pasto estrella, es equiparable respecto a los sistemas estudiados, debido a que representa una menor emisión de CO₂e, y una mayor eficiencia en el uso del recurso hídrico, así como la ausencia de vertido.

5.2. Recomendaciones

- Replicar las mediciones de emisión de GEI, aumentando los Beneficios estudiados e incluyendo otras zonas cafetaleras, esto con el fin de mejorar la representatividad de los datos y poder elaborar factores que puedan ser utilizados a nivel nacional.
- Para poder analizar el comportamiento de las emisiones de GEI en el proceso de degradación de la materia orgánica, se recomienda realizar un estudio de alcance menor, pero con un control más estricto de las variables, efectuando mediciones diarias de las emisiones.
- Contemplar las variaciones climáticas que afectan la duración de las cosechas en las diferentes zonas, así como la cantidad de café procesado, para evitar retrasos en las mediciones debidos a la inexistencia de agua en los STAR.

- Medir la temperatura del agua de las lagunas y reactores a diferentes profundidades, para poder analizar los flujos de emisión en los diferentes niveles y buscar correlación entre estos, ya que la temperatura ambiental no es representativa de lo que sucede en toda la columna de agua. De igual forma, se puede incluir un perfil de sedimentos, de oxígeno disuelto y DQO, en cada una de las unidades que constituyen los diferentes STAR.
- Para el análisis de viabilidad, solicitar a los Beneficios expresar los datos en las unidades requeridas, y así evitar errores de cálculo o el aumento de la incertidumbre de las mediciones, debido a la conversión de unidades.

6. REFERENCIAS²

- Adams, M. 2006. A multi-criteria evaluation methodology for an economically and environmentally sustainable coffee industry. Tesis Ph.D. Nueva Escocia, Canadá. Dalhousie University. 374 p.
- Álvarez Bernal, D; Contreras Ramos, SM; Poggi Varaldo, HM. 2002. Sistemas de tratamiento de aguas residuales por aplicación al suelo. Avance y Perspectiva 21:333-340.
- Arenas Calle, LN. 2015. Diseño de una cámara estática cerrada y medición de flujos de gases de efecto invernadero (GEI) en suelos (en línea). Tesis Mgtr. Palmira, Colombia, Universidad Nacional de Colombia. 93 p.
- Arias Zúñiga, AL. 2010. Decimosexto informe estado de la nación en desarrollo humano sostenible: situación de potabilización y saneamiento en Costa Rica (en línea). Costa Rica. Consultado 14 jun. 2018. Disponible en: https://estadonacion.or.cr/files/biblioteca_virtual/016/ana_arias.pdf
- Benito, Y. 2016. Guía específica de trabajo sobre CO₂ y cambio climático. Fundación San Patricio (en línea). Consultado 15 jun. 2018. Disponible en: <https://www.fundacionsanpatricio.org/es/investiga/pdf/guias2016-17/Guia%20introdutoria%20al%20tema%20CO2%20y%20cambio%20climatico.pdf>
- Besora Magem, J. 2016. Tecnologías apropiadas para la caficultura secadores solares. Serie tecnologías para el desarrollo humano de los Andes. Perú. 26 p.

² Referencias elaboradas con base en IICA 2016. 5ª edición.

Café de Costa Rica. 2011. Beneficiado de café en armonía con la naturaleza. (en línea). Costa Rica. Consultado 17 abr. 2015. Disponible en: http://www.cafedecostarica.com/esp/ModeloSostenible_Ambiental.html

Café de Costa Rica. 2015. [Zonas cafetaleras de Costa Rica] (en línea). Consultado 15 jun. 2018. Disponible en: <http://www.cafedecostarica.com>

Cañadas Molina, V. 2014. Análisis de la viabilidad técnica y económica de una planta de gasificación de biomasa residual agrícola para suministro de una central de cogeneración en la comarca del Segrià. Barcelona, España, Universitat de Barcelona. 74 p.

Cantú Martínez, PC. 2015. Ascenso del desarrollo sustentable: de Estocolmo a Río +20. Ciencia UANL 18(75):33-39.

Carazo, E; Figueroa, A; Pentzke, C. 2012. Cambio Climático y Ecosistemas en Centroamérica: una oportunidad para la acción (en línea). Centro de Estudios y Publicaciones Alforja. Costa Rica. Consultado 15 mar. 2018. Disponible en: https://estadonacion.or.cr/files/biblioteca_virtual/educacion/Documento-completo-Cambio-climatico-ecosistemas-CA.pdf

Cárdenas Arévalo, JE; Vásquez López, J. 2013. Análisis del ciclo de vida del procesamiento y la distribución del café del beneficio ecológico en la finca Juancito y convencional en la finca La Montaña, Francisco Morazán, Honduras. Tesis Lic. Zamorano, Honduras, Escuela Agrícola Panamericana. 28 p.

Cárdenas Garzón, RC; Ortiz Prieto, JE. 2014. Manejo integrado del recurso agua, en el proceso de beneficio húmedo del café, para la asociación de productores de café especial “acafeto” en

el municipio de Fresno, departamento del Tolima. Tesis Mgtr. Manizales, Colombia. Universidad de Manizales. 164 p.

Caso Vega, RI. 2003. Evaluación de la aptitud de un terreno para la selección de un sistema de tratamiento natural de baja carga. Tesis Ing. Coahuila, México, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. 59 p.

CDKN (Alianza Clima y Desarrollo); ODI (Overseas Development Institute). 2014. El Quinto Reporte de Evaluación del IPCC: ¿Qué implica para Latinoamérica? (en línea). Consultado 22 mar. 2018. Disponible en: <https://cdkn.org/wp-content/uploads/2014/12/INFORME-del-IPCC-Que-implica-para-Latinoamerica-CDKN.pdf>

CEGESTI (Centro de Gestión Tecnológica Industrial). 2005. Manual de transferencia y adquisición de tecnologías sostenibles. San José, Costa Rica. 55 p. ISBN 9968-9821-3-X.

CFIA (Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica). 2017. Código de Instalaciones Hidráulicas y Sanitarias en Edificaciones (en línea). Consultado 13 jun.. 2018. Disponible en: http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_norma.aspx?param1=NRM&nValor1=1&nValor2=83561&nValor3=107558&strTipM=FN

Chacón Araya, R. 2011. Sistema de tratamiento de aguas residuales del Beneficiado por aspersión sobre el Pasto Estrella. Heredia, Costa Rica. Boletín PROMECAFE, 127: 7-11.

Chacón Araya, R. 2015. Propuestas de las NAMA café en Costa Rica (entrevista). Heredia, Costa Rica. Icafe.

Cisterna Osorio, P; Peña, D. 2002. Determinación de la relación DQO/DBO5 en aguas residuales de comunas con población menor a 25.000 habitantes en la VIII región (en línea) Chile.

Consultado 15 jun. 2018. Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/chile13/trab-12.pdf>

Colón, R. 1996. Treatment of Coffee Wastewater by the Upflow Anaerobic Sludge Blanket Process. Tesis M.Sc. PR. University of Puerto Rico. 81 p.

Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. 2013. Conferencia de las Partes en calidad de reunión de las Partes en el Protocolo de Kyoto (en línea). Consultado 15 mar. 2018. Disponible en: <http://unfccc.int/resource/docs/2012/cmp8/spa/13a01s.pdf>

Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. 2014. Focus: Mitigation. (en línea). Consultado 22 may. 2018. Disponible en: <http://unfccc.int/focus/mitigation/items/7169.php>

Correa Bravo, J. 2016. Emisiones de gases de efecto invernadero en el humedal natural El Madrigal. Tesis Ing. Santiago de Cali, Colombia, Universidad del Valle. 72 p.

Cortés Giraldo, V; Jaramillo Mena, L; Marín Aponte, DA; Torres Paredes, JP; Vega Báez, LY; Zuluaga Piedrahita, JD. 2016. Diseño de un Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales para el 70% del Cabecera Municipal de Cajamarca, Tolima. Pontificia Universidad Javeriana Cali. Colombia. Consultado 16 jun. 2018. Disponible en: http://vitela.javerianacali.edu.co/bitstream/handle/11522/8643/Articulo_cientifico.pdf?sequence=2&isAllowed=y

Cortez Abanto, D; Díaz Collantes, G; Murga Saldaña, D; Pereyra Chavez, T; Rodas Muñoz, V; Tirado Salazar, I. 2017. Descripción de los componentes de la PTAR-C y breves alcances del proyecto eficiencia de *Lemna sp* y *Eirchhornia crassipes* en la remoción de nutrientes del afluente de la PTAR en Celendín. Cajamarca, Perú. 22 p.

- Crombet Grillet, S; Abalos Rodríguez, A; Rodríguez Pérez, S; Pérez Pompa, N. 2016. Evaluación del tratamiento anaerobio de las aguas residuales de una comunidad universitaria. Revista Colombiana de Biotecnología 18(1):49-56. ISSN 1909-8758.
- Diocaretz Vergara, MC. 2010. Aspectos técnicos y económicos de procesos de higienización de lodos provenientes del tratamiento de aguas servidas. Tesis Ing. Concepción, Chile, Universidad de Concepción. 119 p.
- Domínguez Ollero, R. 2015. Diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales urbanas para poblaciones entre 20 y 25 mil habitantes. Tesis Ing. Leganés, España, Universidad Carlos III de Madrid. 107 p.
- EPA (Agencia de Protección Ambiental, USA). 1999. Folleto informativo de tecnología de aguas residuales: Zanjas de oxidación. (en línea). Consultado 16 jun. 2018. Disponible en: http://water.epa.gov/aboutow/owm/upload/2004_07_07_septics_cs_00_013.pdf
- EPA (U.S. Environmental Protection Agency). 2013. Energy Efficiency in Water and Wastewater Facilities: a guide developing and implementing greenhouse gas reduction programs (en línea). Consultado 14 jun. 2018. Disponible en: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-08/documents/wastewater-guide.pdf>
- Espinoza Silva, LE. 2014. Sostenibilidad de las unidades básicas de saneamiento de arrastre hidráulico con pozo séptico y con biodigestor en la comunidad de Quinuamayo Alto-Distrito La Encañada- Cajamarca 2014. Tesis Ing. Cajamarca, Perú, Universidad Nacional de Cajamarca. 127 p.
- Estado de la Nación. 2014. Capítulo 4: Armonía con la naturaleza (en línea). San José, Costa Rica. Consultado 16 abr. 2018. Disponible en: www.estadonacion.or.cr/

- Estado de la Nación. 2017. Capítulo 4: Armonía con la naturaleza (en línea). San José, Costa Rica. Consultado 19 jun. 2018. Disponible en: <http://estadonacion.or.cr/2017/assets/en-23-2017-book-low.pdf>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2004. Perspectivas a plazo medio de los productos básicos agrícolas: Proyecciones al año 2010. (en línea). Consultado 16 jun. 2018. Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-y5143s.pdf>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2013. Anuarios estadísticos de la FAO: La agricultura y la alimentación en el mundo. (en línea). Consultado 16 jun. 2018. Disponible en: http://www.fao.org/economic/ess/ess-publications/anuario-estadistico/es/#.VTE6bdIn_Gc
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2014. Emisiones de gases de efecto invernadero de la agricultura, la silvicultura y otros usos de la tierra. (en línea). Consultado 16 jun. 2018. Disponible en: <http://www.fao.org/climatechange/micca/ghg/es/>
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. 2007. Descripción del proceso productivo y del beneficio del café: guía tecnológica del cultivo. Guía Ambiental para el Sector Cafetalero 2(6):51-80.
- Gálvez Gudiel, CA. 2013. Eficiencia de la planta de tratamiento de agua residual de San Lucas Sacatepéquez. Tesis Lic. Guatemala, Universidad Rafael Landívar. 79p.
- Gutiérrez Guzmán, N; Valencia Granada, E; Aragón Calderón, RA. 2014. Eficiencia de remoción de DBO₅ y SS en sedimentador y lecho filtrante para el tratamiento de aguas residuales del beneficio de café (*Coffea arabica*). Colombia Forestal 17(2):151-159.

- Henry, JG; Heinke, GW. 2000. Ingeniería Ambiental. 2 ed. PRENTICE HALL. México. 800 p.
- Hristov, AN; Oh, J; Lee, C; Meinen, R; Montes, F; Ott, T; Firkins, J; Rotz, A; Dell, C; Adesogan, A; Yang, W; Tricarico, J; Kebreab, E; Waghorn, G; Dijkstra, J; Oosting, S. 2013. Mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero en la producción ganadera: una revisión de las opciones técnicas para la reducción de las emisiones de gases diferentes al CO₂. Producción y Sanidad Animal FAO. (177). FAO, Roma, Italia.
- Icafe (Instituto del Café de Costa Rica). 2012. NAMA Café: una herramienta para el desarrollo bajo en emisiones (en línea). Costa Rica. Consultado 16 jun. 2018. Disponible en: <http://www.mag.go.cr/informacion/prog-nac-cafe-NAMA-herramienta-desarrollo-bajo-en-emisiones.pdf>
- Icafe (Instituto del Café de Costa Rica). 2017. Informe sobre la actividad cafetalera de Costa Rica (en línea). Heredia, Costa Rica. Consultado 15 jun. 2018. Disponible en: http://www.icafe.cr/wp-content/uploads/informacion_mercado/informes_actividad/actual/InformeActividadCafetalera.pdf.pdf
- IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, España). 2007. Biomasa: digestores anaerobios. Madrid, España, IDEA. 48 P. ISBN-13: 978-84-96680-21-0
- IICA (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura) y CATIEJ (Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco A.C). 2016. La Situación y tendencias de la producción de café en América Latina y el Caribe. San José, Costa Rica. 126 p. ISBN: 978-92-9248-651-8.

- IMN (Instituto Meteorológico Nacional, Costa Rica). 2017. Factores de emisión de gases de efecto invernadero (en línea). 7 ed. Consultado 15 jun. 2018. Disponible en: <http://cglobal.imn.ac.cr/index.php/publications/factores-de-emision-gei-setima-edicion-2017/>
- Infante Ramos, MA. 2017. Tecnologías para el aprovechamiento del metano disuelto en el efluente procedente del tratamiento anaerobio de aguas residuales urbanas. Tesis Ing. Valladolid, España. Universidad de Valladolid. España. 103 p.
- IPCC (Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático). 2007. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. (en línea). Consultado 17 abril 2015. Disponible en: http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_wg1_report_the_physical_science_basis.htm
- IPCC (Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático). 2013. Climate change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Stocker, TF; Qin, D; Plattner, GK; Tignor, M; Allen, SK; Boschung, J; Nauels, A; Xia, Y; Bex, V; Midgley, PM (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom. 1535 p.
- IPCC (Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático). 2014. Cambio climático 2014 Informe de síntesis resumen para responsables de políticas. (en línea). Consultado 18 jun 2018. Disponible en: https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/AR5_SYR_FINAL_SPM_es.pdf

- Jaubert Calvo, OG. 2004. Evaluación de la viabilidad técnica para la utilización de un reactor del tipo U.A.S.B. en el tratamiento de aguas de un beneficio. Tesis Lic. San José, Costa Rica, Universidad de Costa Rica. 154 p.
- Kampschreur, MJ; Temmink, H; Kleerebezem, R. 2009. Nitrous oxide emission during wastewater treatment. *Water Research* 43(17):4093-4103.
- Korsak, L. 2010. Taller de Capacitación. Sistema de Aguas Residuales para el Sector Café (en línea). Nicaragua. Consultado 14 jun. 2018. Disponible en: <https://www.mific.gob.ni/Portals/0/Documentos%20UGA/Documentos/Presentaci%C3%B3n%20STAR%20Caf%C3%A9.pdf>
- LAA (Laboratorio de Análisis Ambiental, Costa Rica). 2015. Procedimiento de Métodos de Análisis PMA-051. Universidad Nacional. Heredia, Costa Rica.
- Lasso Palacios, AP. 2010. Cámaras estáticas para la estimación de emisiones de gases de efecto invernadero en las lagunas de estabilización para el tratamiento de aguas residuales domésticas. Cali, Colombia. Universidad del Valle.
- Ley de Aguas. N° 276. Congreso Constitucional de la República de Costa Rica. 27 ago. 1942.
- Li, B. 2006. Mitigation of Microclimate Variation through Agroforestry: Protecting Coffee Agriculture from the Impacts of Climate Change. Tesis Ph.D. Michigan, Estados Unidos de América. University of Michigan. 162 p.
- López, E. 2009. Manifestación de impacto ambiental hidráulico modalidad particular (en línea). Guanajuato, México. Consultado 15. Jun. 2018. Disponible en: <http://sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/gto/estudios/2007/11GU2007HD057.pdf>

- Lorenzo, Y; Obaya, MC. 2006. La digestión anaerobia y los reactores UASB: generalidades. ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar 40(1):13-21. ISSN 0138-6204.
- Manahan, S. 2000. Environmental Chemistry. 7 ed. Boca Ratón, Florida. CRC Press. 914 p. ISBN 1-56670-492-8
- Manrique, R; Jiménez, H; Álvaro, H; Torralba, R; Acosta, L. 2002. Estudio de Viabilidad: sistema de aprovechamiento de las aguas residuales en el Fundo San Agustín, Callao - Perú. Lima, Perú, IDRC. 60 p.
- Márquez Vázquez, M; Martínez González, S. 2011. Reactores Anaerobios de Flujo Ascendente (RAFA's o UASB): antología. México, Centro Tecnológico Aragón. 31 p.
- Mase, A. 2014. Climate change risks, information, and adaptation: Perspectives of Midwestern U.S. Farmers and advisors. Tesis Ph.D. Indiana, Estados Unidos de América. Purdue University. 178 p.
- Mercado, A. 2013. Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales y Reúso: lagunas de estabilización (en línea). Santa Cruz, Bolivia, Universidad Mayor de San Simón. Consultado 15 jun. 2018. Disponible en: <http://casa.fcyt.umss.edu.bo/publicaciones.html>
- MINAE (Ministerio de Ambiente y Energía, Costa Rica). 2010. Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales. N° 33601.
- MINAE (Ministerio de Ambiente y Energía, Costa Rica). 2015. Una acción climática para un desarrollo bajo en emisiones y resiliente. Costa Rica. Consultado 15 mar. 2018. Disponible en:
<http://www4.unfccc.int/ndcregistry/PublishedDocuments/Costa%20Rica%20First/INDC%20Costa%20Rica%20Version%202%200%20final%20ES.pdf>

- MINAET (Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones, Costa Rica). 2009. Estrategia Nacional de Cambio Climático (en línea). San José, Costa Rica. Consultado 13 jun. 2015. Disponible en: <http://cambioclimaticocr.com/2012-05-22-19-42-06/estrategia-nacional-de-cambio-climatico>
- Molina Guardado, AE; Villatoro Martínez, RA. 2006. Propuesta de tratamientos de aguas residuales en beneficios húmedos de café. Tesis Ing. San Salvador, El Salvador, Universidad de El Salvador. 298 p.
- Montero Martínez, J. 2000. Análisis de la distribución de agua en sistemas de riego por aspersión estacionario: desarrollo del modelo de simulación de riego por aspersión (SIRIAS). 3 ed. Tesis doctorales I. Universidad de Castilla-La Mancha. España. 352 p. ISBN 84-84-27-056-4.
- Moreira, D; Castro, C. 2016. Resiliencia al cambio climático en el cultivo de café: Hacienda Aquiares. San José, Costa Rica, IICA. 12 p.
- Moreno Merino, L; Fernández Jurado, MA; Rubio Campos, JC; Calforra Chordi, JM; López Geta, JA; Beas Torroba, J; Alcaín Martínez, G; Murillo Díaz, JM; Gómez López, JA. 2003. La depuración de aguas residuales urbanas de pequeñas poblaciones mediante infiltración directa en el terreno. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid, España. 168 p. ISBN: 84-7840-464-3
- Morgan Sagastume, F; Morgan Sagastume, JM; Noyola Robles, A. 2001. Aplicabilidad de la digestión anaerobia para el tratamiento de aguas residuales municipales (en línea). México, D.F., UNAM. 8 p. Consultado 15 jun 2018. Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/aresidua/mexico/01405e14.pdf>

- Muñoz Prado, AM. 2011. Evaluación técnica y ambiental de una unidad de evaporación como alternativa de tratamiento de aguas de producción de la fase de explotación de hidrocarburos. Tesis Ing. Bogotá, Colombia, Universidad Libre. 138 p.
- Novick, K. 2010. Reducing uncertainty in the biosphere-atmosphere exchange of trace gases. Tesis Ph.D. Carolina del Norte, Estados Unidos de América. Duke University. 253 p.
- Núñez García, AL. 2015. Caracterización de la problemática de las aguas residuales en Ixmiquilpan Hidalgo. Tesis Lic. Iztapalapa, México, Universidad Autónoma Metropolitana. 90 p.
- ONU (Organización de las Naciones Unidas). 2015. Historia de las Naciones Unidas. (en línea). Consultado 22 mayo 2015. Disponible en: <http://www.un.org/es/sections/history/history-united-nations/index.html>
- Osorio Velásquez, NY. 2016. Percepciones sobre calidad ambiental y procesos productivos de productores de café en el municipio el Águila, Colombia. Tesis Mst. Tijuana, México, Colegio de la Frontera Norte. 152 p.
- Parra, R; Apaza, G; Agramont, A. 2010. Estimación de factores de emisión de gases de efecto invernadero en una planta de tratamiento de aguas residuales. Revista Boliviana de Química. 27 (2):81-88.
- Peters Seevers, R. 2009. Tratamiento de aguas del proceso de beneficiado por aspersión sobre pasto “estrella” (*Cynodom mnlenuensis*). San José, Costa Rica. Icafe. Circular #1554.
- Picón, JC; Hernández, A; Bravo, J. 2014. Cambio climático, transformaciones en la línea costera y turismo de sol y playa en la costa pacífico-norte costarricense. Ambientico (246):16-22.

- Reutelshöfer, T. 2015. Guía de Operación y Mantenimiento de Lagunas de Oxidación en Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales: para operadores. La Paz, Bolivia, PERIAGUA. 70 p.
- Romero, JA. 2014. Tratamiento de aguas residuales, teoría y principios de diseño. Santa Fe, Bogotá, Colombia. Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Rosenkranz Fernández, F. 2013. Estudio del comportamiento de reactores anaerobios de tipo ASBR frente a compuesto de difícil degradación y/o efectores negativos. Tesis PhD. Chile, Universidad Santiago de Compostela. 211 p.
- Sagot Rodríguez, A. 2012. Introducción al derecho ambiental internacional y nacional. Heredia, Costa Rica, Universidad Nacional de Costa Rica.
- Sánchez Hernández, L; Espindola Rafael, V; Van Rikxoort, H; Cipriani, G. 2016. Manual para la construcción de sistemas de tratamiento de aguas residuales (en línea). Consultado 14 jun. 2018. Disponible en: https://www.utz.org/wp-content/uploads/2016/07/Sistema-de-Tratamiento-de-aguas-residuales_Manual.pdf
- Sánchez Maroto, M. 2015. El café, la cafeína y su relación con la salud y ciertas patologías (en línea). Valladolid, España, Universidad de Valladolid. Consultado 15 mar. 2018. Disponible en: <https://uvadoc.uva.es/bitstream/10324/14253/1/TFG-M-N370.pdf>
- Sánchez, A. 2015. Análisis fisicoquímico del agua del arroyo El Hueleque en Poza Rica Ver. Revista Latinoamericana de Recursos Naturales 9(1):1-10. México.
- Saynes Santillán, V; Etchevers Barra, JD; Paz Pellat, F; Alvarado Cárdenas, LO. 2016. Emisiones de gases de efecto invernadero en sistemas agrícolas de México. Terra Latinoamericana 34(1):83-96.

- Sturm, K; Yuan, Z; Gibbes, B; Werner, U; Grinham, A. 2014. Methane and nitrous oxide sources and emissions in a subtropical freshwater reservoir, South East Queensland, Australia. *Biogeosciences*. 11:5245-5258.
- Tejada Tovar, C; Villabona Ortiz, Á; Buelvas Lidueñas, B. 2013. Diagnóstico y evaluación de una planta de tratamiento de agua potable: estudio de caso. *Ingenium* 7(16):39-49. Cartagena, Colombia.
- Thakkar, K. 2014. Integrated modeling approach for energy alternatives and Green House Gas mitigation assessment in the state of Florida. Tesis. M.Sc., Florida, USA. Florida Atlantic University. 243 p.
- Torres, M; Karim, P; Salazar, F. 2006. Tamaño de una muestra para una investigación de mercado. *Boletín Electrónico Ingeniería Primero* (2):1-13. Universidad Rafael Landívar. Guatemala.
- Torres, P. 2012. Perspectivas del tratamiento anaerobio de aguas residuales domésticas en países en desarrollo. *Revista EIA* (18):115-129. Medellín, Colombia. ISSN 1794-1237.
- Ulate, J. 2017. Importancia de las variables para determinar la viabilidad de un STAR (entrevista). Heredia, Costa Rica, Beneficio Coopronaranja R.L.
- UTPL (Universidad Técnica Particular de Loja). 2010. Guía para la Selección de Tecnologías de Depuración de Aguas Residuales por Métodos Naturales: en poblaciones menores a 5000 habitantes de la Provincia de Loja. Loja, Ecuador, UTPL. 227 p.
- Wu, J; Zhang, J; Jia, W; Xie, H; Gu, R; Li, C; Gao, B. 2009. Impact of COD/N ratio on nitrous oxide emission from microcosm wetlands and their performance in removing nitrogen from wastewater. *Bioresource Technology* 100 (12): 2910-2917.

7. APÉNDICE

7.1. Generalidades

Apéndice 1. Cuestionario para el diagnóstico de los Sistemas de tratamiento de aguas residuales en los Beneficios de café.

CUESTIONARIO PARA EL DIAGNÓSTICO DEL ESTADO DE LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN LOS BENEFICIOS DE CAFÉ

Este cuestionario es una herramienta para el diagnóstico del estado y la eficiencia de los sistemas actuales de tratamiento de aguas residuales en los beneficios de café del país, como parte del desarrollo de un proyecto realizado en conjunto con el Icafe y el Laboratorio de Análisis Ambiental de la Universidad Nacional.

Nombre del Beneficio: _____

Fecha: _____

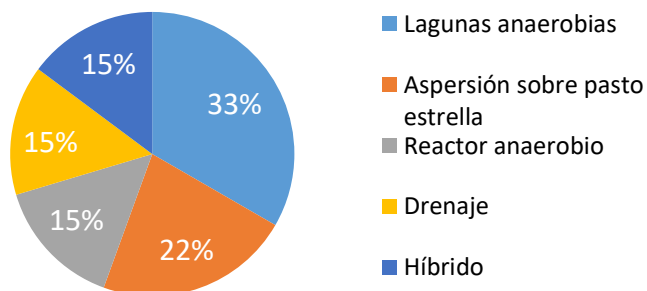
1. Ubicación: _____
2. Región cafetalera a la que pertenece: _____
3. Altitud de la zona: _____
4. Período de cosecha: De _____ a _____
5. Cantidad de café procesado (fan/año): _____
6. Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales (STAR) utilizado: _____
7. Área superficial del STAR: _____
8. Capacidad instalada de la producción del beneficio (fan/año): _____
9. Capacidad instalada del STAR (m³): _____
10. Cantidad de Carga orgánica para la que fue diseñado el STAR: _____
11. Cantidad actual de carga orgánica entrante al STAR: _____
12. Eficiencia de remoción de diseño de STAR: _____
13. Eficiencia de remoción actual del STAR: _____
14. Resultados del último reporte operacional:
 - Caudal: _____

- Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5,20): _____
- Demanda Química de Oxígeno (DQO): _____
- Potencial de hidrógeno (pH): _____
- Grasas y aceites (GyA): _____
- Sólidos sedimentables (SSed): _____
- Sólidos suspendidos totales (SST): _____
- Sustancias activas al azul de metileno (SAAM): _____
- Temperatura (T): _____

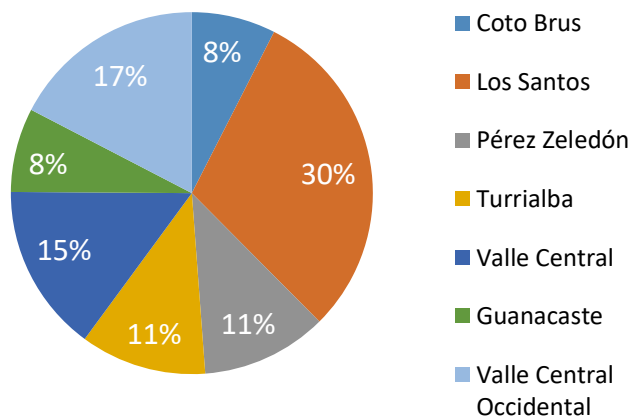
En caso de que algún parámetro no cumpla con los límites establecidos por el Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales. ¿Qué medidas correctivas se tomaron para corregir el incumplimiento?:

Apéndice 2. Datos generales de los Beneficios diagnosticados en la Etapa I.

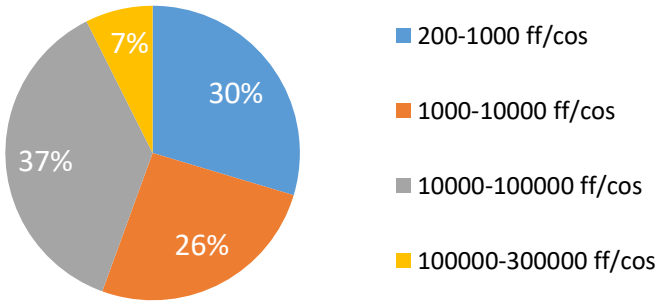
2.1. Tipos de STAR de los Beneficios participantes en la etapa de diagnóstico.



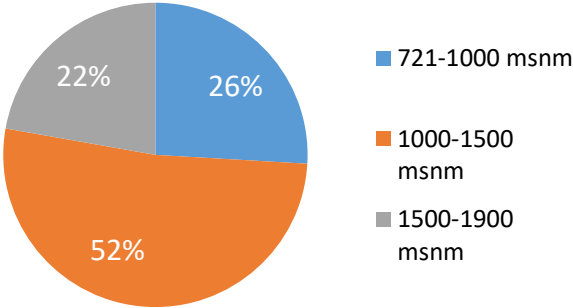
2.2. Regiones cafetaleras a las que pertenecen los Beneficios donde se realizó el diagnóstico.



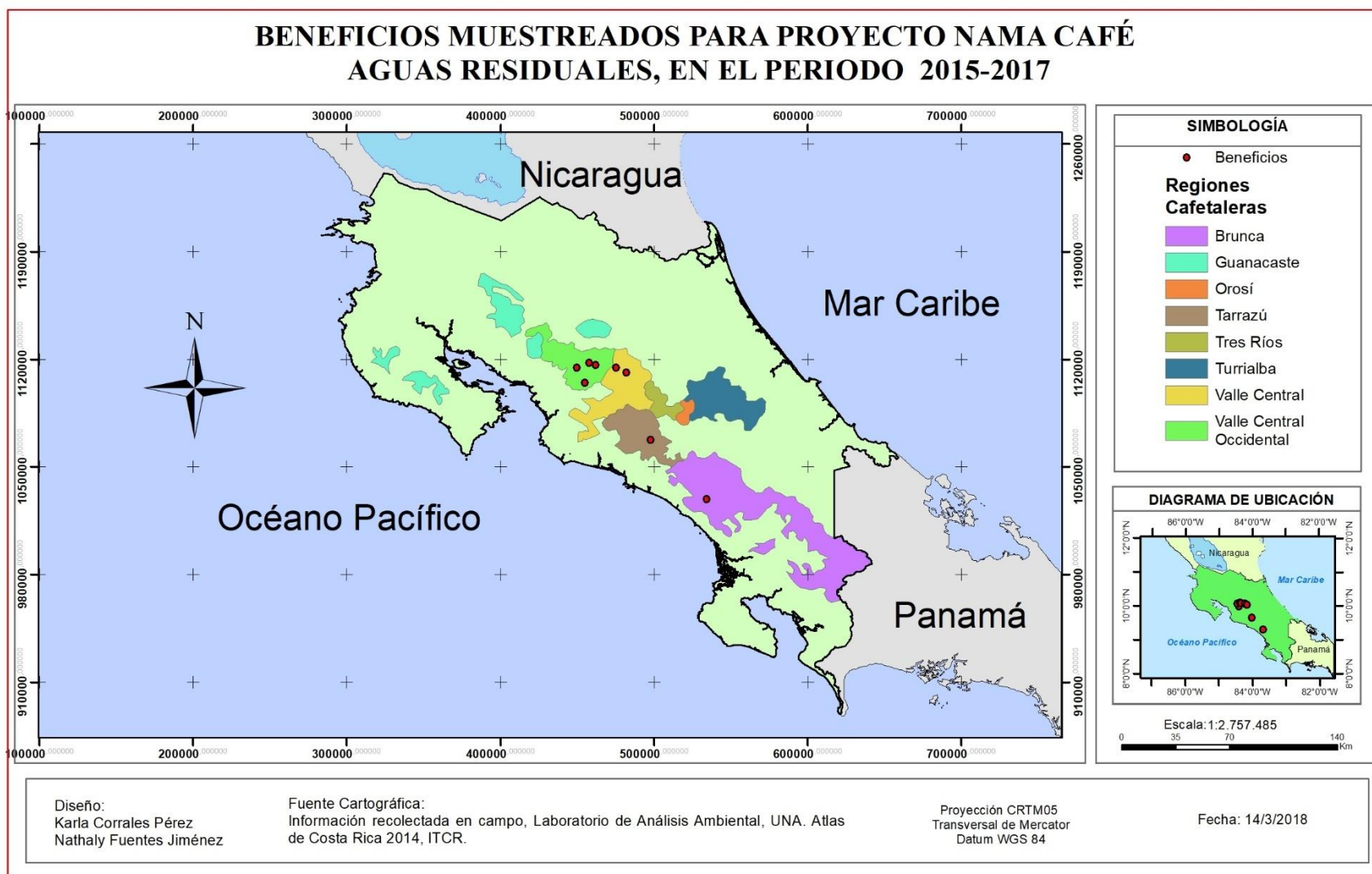
2.3. Rango de fanegas procesadas por cosecha en los Beneficios analizados en el diagnóstico.



2.4. Altitud de los Beneficios participantes del diagnóstico.



Apéndice 3. Ubicación de los Beneficios para la medición de emisiones de GEI.



Apéndice 4. Áreas de emisión de los STAR de los Beneficios analizados.

| STAR | Beneficio | Unidades | # Secciones | Medida por sección (m ²) | Medida por unidad (m ²) | Área total de emisión (m ²) |
|--------------------|---|-------------------------|-------------|--------------------------------------|-------------------------------------|---|
| Lagunas anaerobias | Santa Rosa Ltda. | Sedimentador | 3 | 3 | 9 | 1429 |
| | | Lagunas | 1 | 340 | 1412 | |
| | | | 1 | 672 | | |
| | | | 1 | 400 | | |
| | Lecho de lodos | 1 | 8 | 8 | | |
| | Café de Altura de San Ramón Especial S.A. | Tanque temporal | 2 | 9 | 54 | |
| | | | 2 | 18 | | |
| | | Sedimentador | 1 | 78 | 78 | 30732 |
| | | Lagunas | 1 | 600 | 600 | |
| | Aspersión | 1 | 30000 | 30000 | | |
| | CoopeAtenas R.L. | Tanque temporal | 2 | 7 | 14 | 4759 |
| | | Sedimentador primario | 2 | 10 | 20 | |
| | | Tanque igualador | 1 | 500 | 500 | |
| | | Sedimentador secundario | 3 | 18 | 54 | |
| | | Lagunas | 1 | 2000 | 4100 | |
| 1 | | | 2100 | | | |
| Lecho de lodos | | 1 | 25 | 71 | | |
| | | 1 | 25 | | | |
| | 1 | 21 | | | | |

| STAR | Beneficio | Unidades | # Secciones | Medida por sección (m ²) | Medida por unidad (m ²) | Área total de emisión (m ²) |
|-------------------------------------|--------------------------------|--------------------------|-----------------|--------------------------------------|-------------------------------------|---|
| | CoopeAgri R.L. | Lagunas | 4 | 990 | 24210 | 34210 |
| | | | 5 | 4050 | | |
| | | Campo aspersión | 1 | 10000 | 10000 | |
| Reactor Anaerobio | CooproNaranja R.L. | Sedimentador primario | 2 | 32,5 | 65 | 919 |
| | | Lagunas | 1 | 530 | 530 | |
| | | Reactor anaerobio | 12 | 19 | 228 | |
| | | Sedimentador secundario | 3 | 32 | 96 | |
| | La Eva S.A. | Sedimentador primario | 2 | 4 | 8 | 378 |
| | | Tanque igualador | 1 | 36 | 36 | |
| | | Reactor anaerobio | 6 | 19 | 114 | |
| | | Sedimentador secundario | 1 | 20 | 20 | |
| | | Lecho de lodos | 1 | 200 | 200 | |
| | Aspersión sobre pasto estrella | CoopeTarrazú R.L. | Campo aspersión | 1 | 100000 | 100000 |
| Hermanos Vargas Hidalgo S.A. | | Campo aspersión | 1 | 600 | 600 | 600 |
| Las Marías S.A. | | Campo aspersión | 1 | 3500 | 3500 | 3500 |

7.2. Beneficio Santa Rosa Ltda.

Apéndice 5. Información general del Beneficio Santa Rosa Ltda.

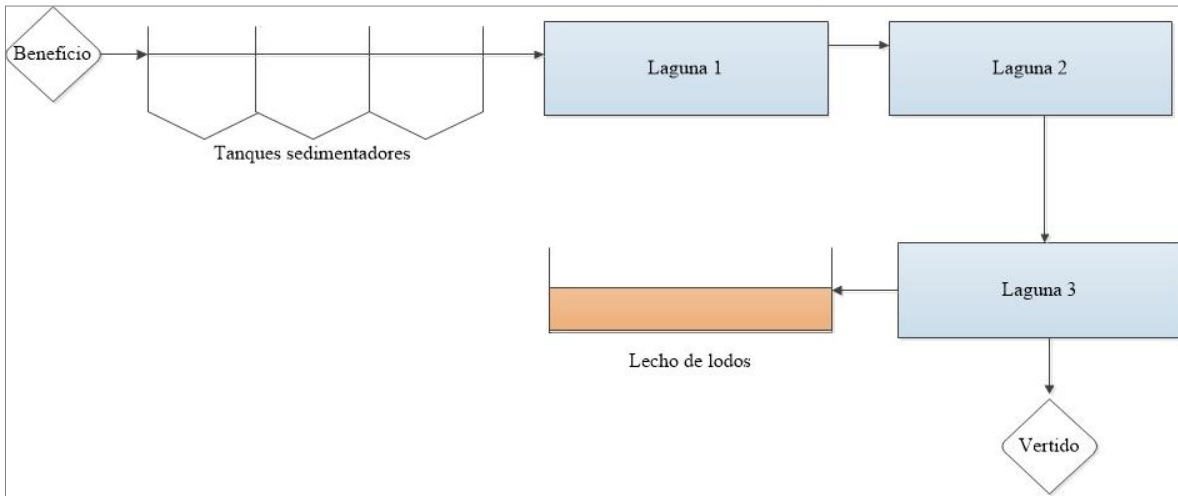
| INFORMACIÓN GENERAL DEL BENEFICIO SANTA ROSA Ltda. | | |
|---|----------------------|--------------------|
| Ubicación | Provincia | Cartago |
| | Cantón | Turrialba |
| | Distrito | Santa Rosa |
| Coordenadas Geográficas | Latitud | 9°59'30,51" N |
| | Longitud | 84°24'43,00" O |
| Altura (msnm) | | 821 |
| Región cafetalera | | Turrialba |
| Estadío maduración zona productiva | | Temprana |
| Período aproximado de cosecha | | Mayo - Febrero |
| Capacidad de procesamiento (fan/cosecha) | | 40 000-45 000 |
| Fanegas procesadas | Período 14-15 | 29 000* |
| | Período 15-16 | 10 031 |
| | Período 16-17 | 22 800 |
| Consumo aproximado de agua por fanega procesada (m³/fanega) | | 0,325 |
| Sistema de tratamiento de aguas residuales | | Lagunas anaerobias |

*Dato aproximado

Apéndice 6. Puntos de muestreo realizados en el Beneficio Santa Rosa Ltda.



Apéndice 7. Diagrama de flujo del STAR del Beneficio Santa Rosa Ltda.



Apéndice 8. Imagen que ilustra el muestreo realizado en la laguna 1 del Beneficio Santa Rosa, en mayo del 2016.

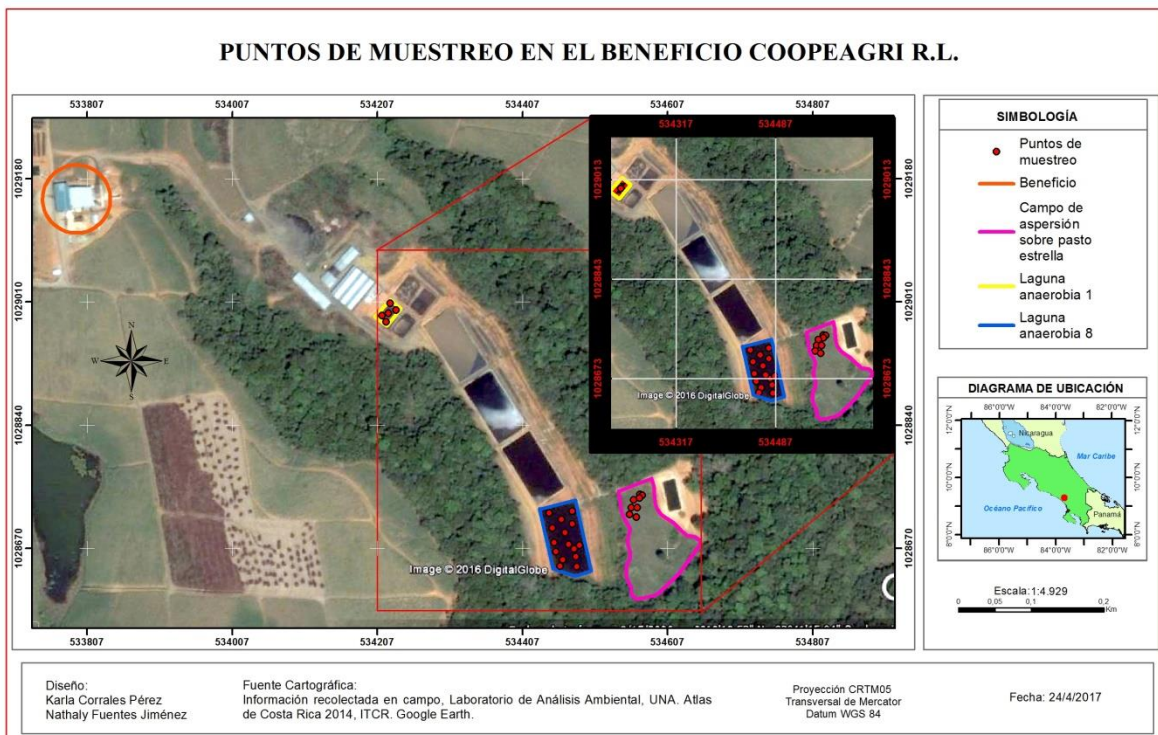


7.3. Beneficio CoopeAgri R.L.

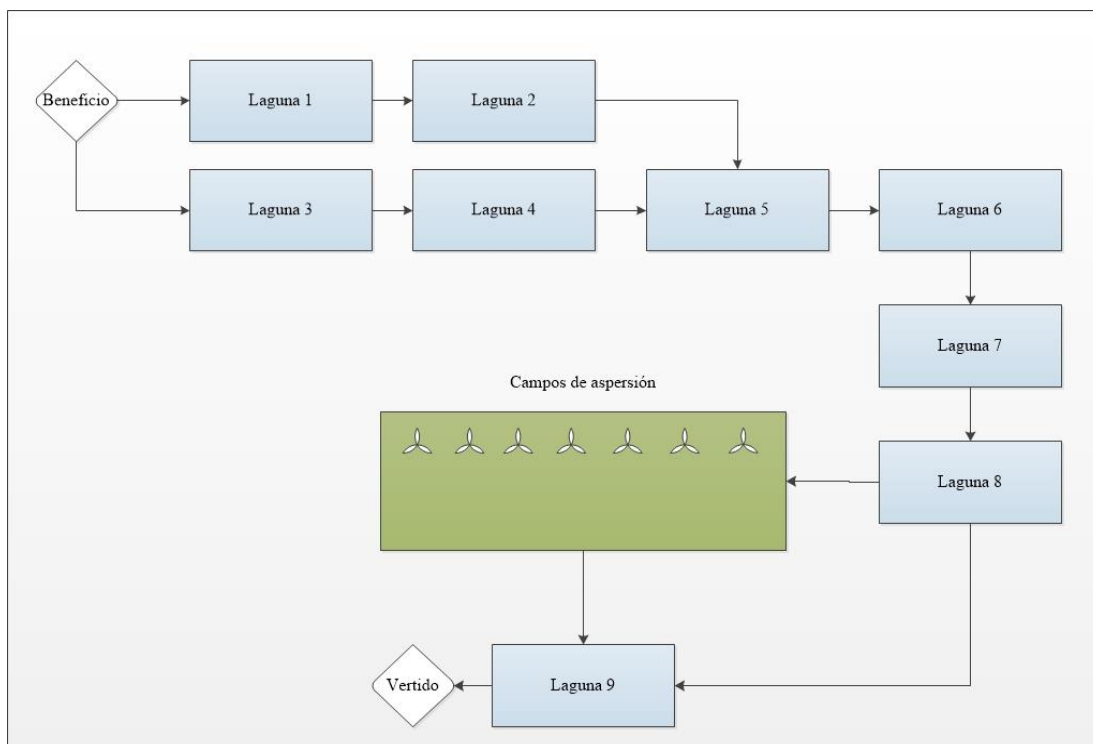
Apéndice 9. Información general del Beneficio CoopeAgri R.L.

| INFORMACIÓN GENERAL BENEFICIO COOPEAGRI R.L. | | |
|---|----------------------|---|
| Ubicación | Provincia | San José |
| | Cantón | Pérez Zeledón |
| | Distrito | San Isidro del General |
| Coordenadas Geográficas | Latitud | 9°18'26,42" N |
| | Longitud | 83°41'32,39" O |
| Altura (msnm) | | 721 |
| Región cafetalera | | Pérez Zeledón |
| Estadío maduración zona productiva | | Temprana |
| Período aproximado de cosecha | | Agosto - Marzo |
| Capacidad de procesamiento (fan/cosecha) | | 240 000 |
| Fanegas procesadas | Período 14-15 | 172 500 |
| | Período 15-16 | 139 782 |
| | Período 16-17 | 129 938 |
| Consumo aproximado de agua por fanega procesada (m³/fanega) | | 0,389 |
| Sistema de tratamiento de aguas residuales | | Lagunas anaerobias/Aspersión sobre pasto estrella |

Apéndice 10. Puntos de muestreo realizados en el Beneficio CoopeAgri R.L.



Apéndice 11. Diagrama de flujo del STAR del Beneficio CoopeAgri R.L.



Apéndice 12. Imagen que ilustra el muestreo realizado en la laguna 8 del Beneficio CoopeAgri, en agosto del 2016.



7.4. Beneficio CoopeAtenas R.L.

Apéndice 13. Información general del Beneficio CoopeAtenas R.L.

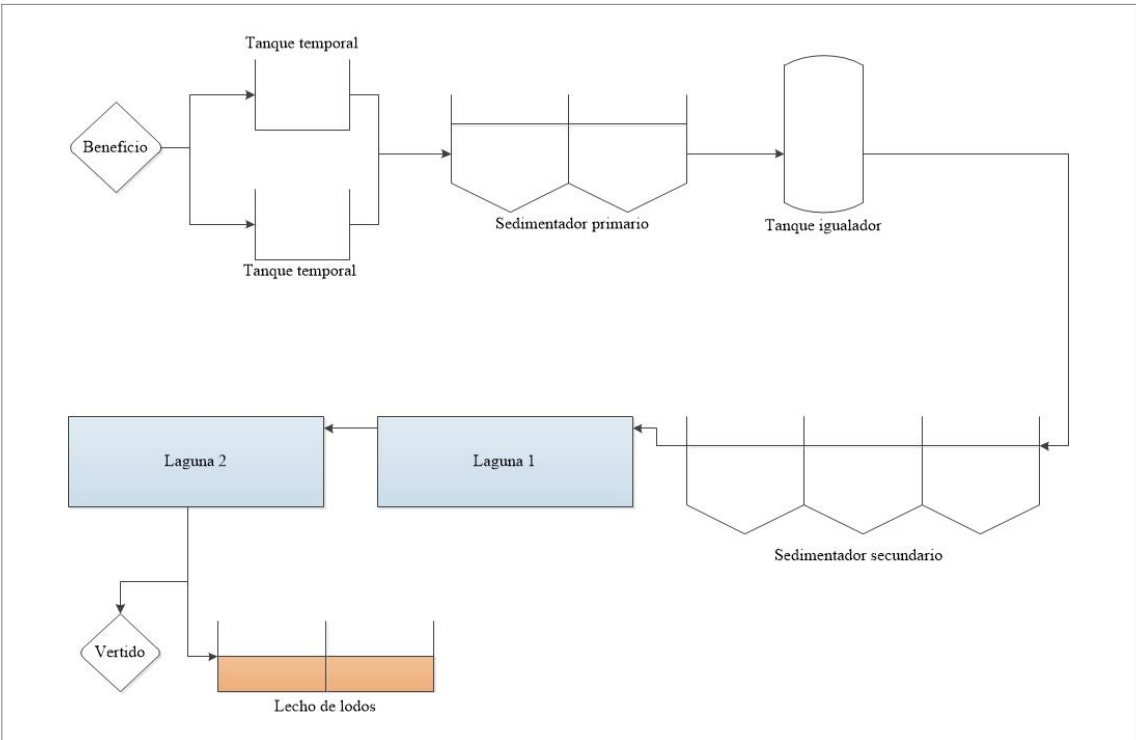
| INFORMACIÓN GENERAL BENEFICIO COOPEATENAS R.L. | | |
|---|----------------------|--------------------------|
| Ubicación | Provincia | Alajuela |
| | Cantón | Atenas |
| | Distrito | Mercedes |
| Coordenadas Geográficas | Latitud | 9°59'30,28" N |
| | Longitud | 84°24'44,38" O |
| Altura (msnm) | | 740 |
| Región cafetalera | | Valle Central Occidental |
| Estadío maduración zona productiva | | Mediana |
| Período aproximado de cosecha | | Setiembre - Febrero |
| Capacidad de procesamiento (fan/cosecha) | | 60 000 |
| Fanegas procesadas | Período 14-15 | 37 000* |
| | Período 15-16 | 43 602,9 |
| | Período 16-17 | 30 975,6 |
| Consumo aproximado de agua por fanega procesada (m³/fanega) | | 0,264 |
| Sistema de tratamiento de aguas residuales | | Lagunas anaerobias |

*Dato aproximado

Apéndice 14. Puntos de muestreo realizados en el Beneficio CoopeAtenas R.L.



Apéndice 15. Diagrama de flujo del STAR del Beneficio CoopeAtenas R.L.



Apéndice 16. Imagen donde se aprecian los puntos de muestreo en el tanque igualador del Beneficio CoopeAtenas, en enero del 2016.



7.5. Beneficio CoopeTarrazú R.L.

Apéndice 17. Información general del Beneficio CoopeTarrazú R.L.

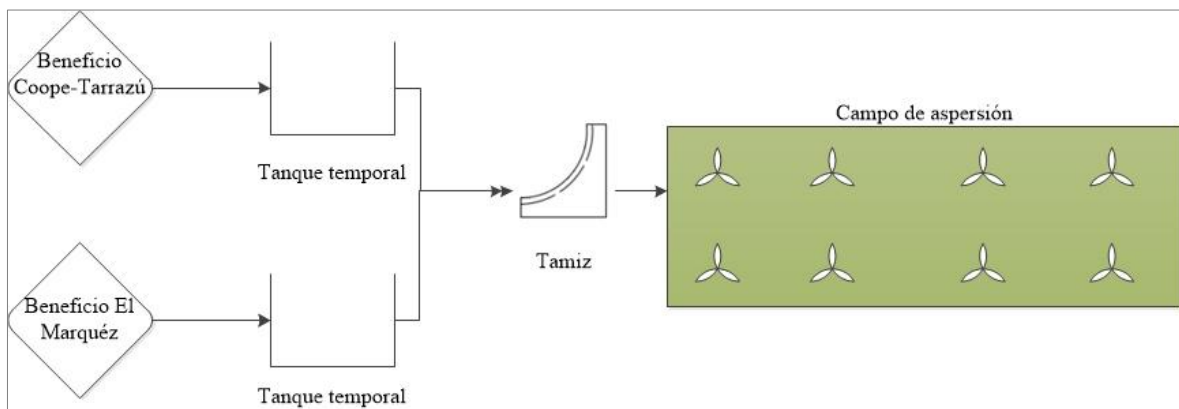
| INFORMACIÓN GENERAL BENEFICIO COOPETARRAZÚ R.L. | | |
|---|----------------------|--------------------------------|
| Ubicación | Provincia | San José |
| | Cantón | Tarrazú |
| | Distrito | San Marcos |
| Coordenadas Geográficas | Latitud | 9°39'21,37" N |
| | Longitud | 84°01'13,31" O |
| Altura (msnm) | | 1327 |
| Región cafetalera | | Los Santos |
| Estadío maduración zona productiva | | Tardía |
| Período aproximado de cosecha | | Noviembre - Marzo |
| Capacidad de procesamiento (fan/cosecha) | | 265 000 |
| Fanegas procesadas | Período 14-15 | 225 000* |
| | Período 15-16 | 252 984 |
| | Período 16-17 | 202 811 |
| Consumo aproximado de agua por fanega procesada (m³/fanega) | | 0,22 |
| Sistema de tratamiento de aguas residuales | | Aspersión sobre pasto estrella |

* Dato aproximado

Apéndice 18. Puntos de muestreo realizados en el Beneficio CoopeTarrazú R.L..



Apéndice 19. Diagrama de flujo del STAR del Beneficio CoopeTarrazú R.L.



Apéndice 20. Imagen donde se aprecian tres de los puntos de muestreo en el campo de aspersión sobre pasto estrella, del Beneficio CoopeTarrazú, en abril del 2016.



7.6. Beneficio Coopronaranjo R.L.

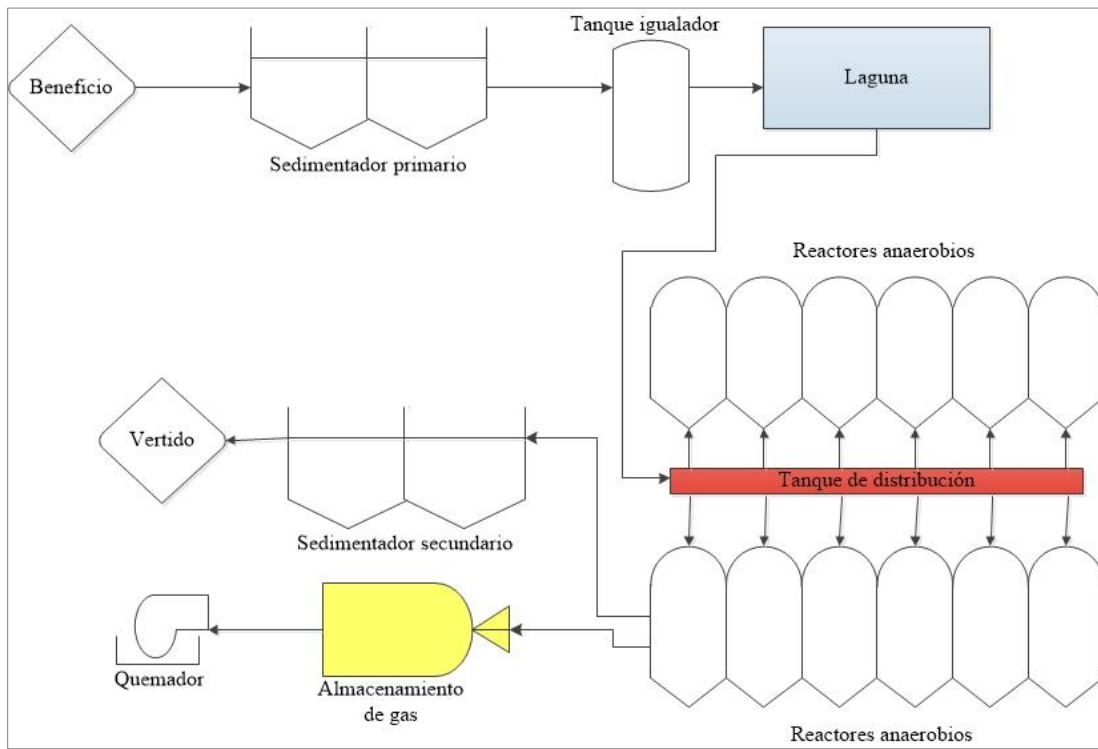
Apéndice 21. Información general del Beneficio Coopronaranjo R.L.

| INFORMACIÓN GENERAL BENEFICIO COOPRONARANJO R.L. | | |
|---|----------------------|--------------------------|
| Ubicación | Provincia | Alajuela |
| | Cantón | Naranjo |
| | Distrito | Naranjo |
| Coordenadas Geográficas | Latitud | 10°06'38,37" N |
| | Longitud | 84°23'06,11" O |
| Altura (msnm) | | 1094 |
| Región cafetalera | | Valle Central Occidental |
| Estadio maduración zona productiva | | Mediana |
| Período aproximado de cosecha | | Octubre - Febrero |
| Capacidad de procesamiento (fan/cosecha) | | 110 000 |
| Fanegas procesadas | Período 14-15 | 57 414,45 |
| | Período 15-16 | 69 342,81 |
| | Período 16-17 | 57 515,46 |
| Consumo aproximado de agua por fanega procesada (m³/fanega) | | 0,288 |
| Sistema de tratamiento de aguas residuales | | Reactor anaerobio |

Apéndice 22. Puntos de muestreo realizados en el Beneficio Coopronaranjo R.L.



Apéndice 23. Diagrama de flujo del STAR del Beneficio Coopronaranjo R.L.



Apéndice 24. Imagen donde se aprecia el punto de toma de muestra del ducto de gas (dentro del círculo rojo), antes del llegar al quemador, en el Beneficio CooproNaranja, en febrero del 2016.



7.7. Beneficio Hermanos Vargas Hidalgo

Apéndice 25. Información general del Beneficio Hermanos Vargas Hidalgo.

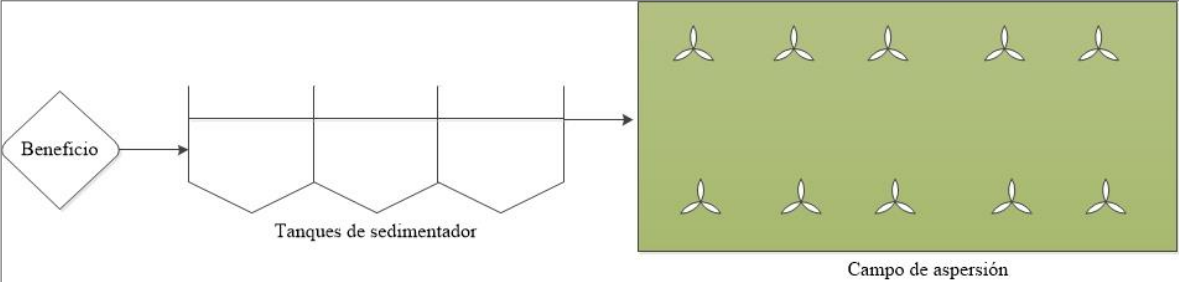
| INFORMACIÓN GENERAL BENEFICIO HERMANOS VARGAS HIDALGO S.A. | | |
|---|----------------------|--------------------------------|
| Ubicación | Provincia | Alajuela |
| | Cantón | Alajuela |
| | Distrito | Sabanilla |
| Coordenadas Geográficas | Latitud | 10°04'53,82" N |
| | Longitud | 84°13'34,98" O |
| Altura (msnm) | | 1261 |
| Región cafetalera | | Valle Central |
| Estadío maduración zona productiva | | Mediana |
| Período aproximado de cosecha | | Setiembre - Febrero |
| Capacidad de procesamiento (fan/cosecha) | | 4 500 |
| Fanegas procesadas | Período 14-15 | 3 000* |
| | Período 15-16 | 1 725 |
| | Período 16-17 | 1 753 |
| Consumo aproximado de agua por fanega procesada (m³/fanega) | | 0,0045 |
| Sistema de tratamiento de aguas residuales | | Aspersión sobre pasto estrella |

* Dato aproximado

Apéndice 26. Puntos de muestreo realizados en el Beneficio Hermanos Vargas Hidalgo.



Apéndice 27. Diagrama de flujo del STAR del Beneficio Hermanos Vargas Hidalgo.



Apéndice 28. Imagen donde se aprecia un punto de muestreo realizado en el campo de aspersión sobre pasto estrella del Beneficio Hermanos Vargas Hidalgo, en febrero del 2016.



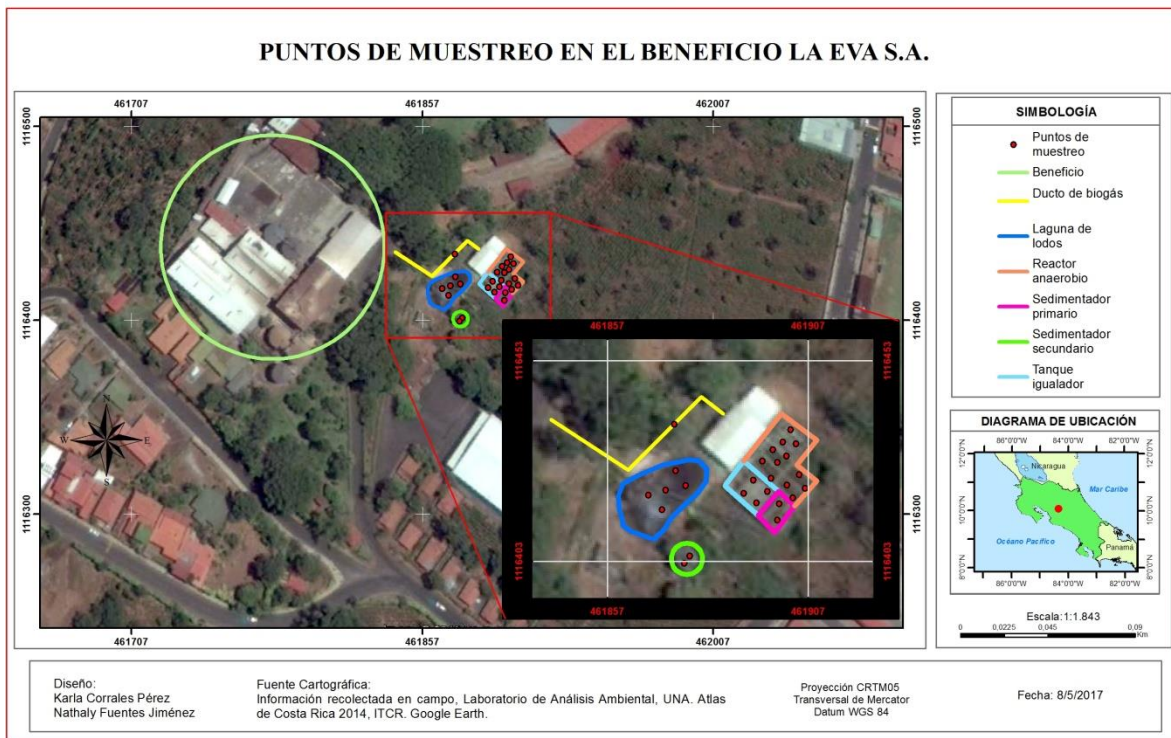
7.8. Beneficio La Eva

Apéndice 29. Información general del Beneficio La Eva.

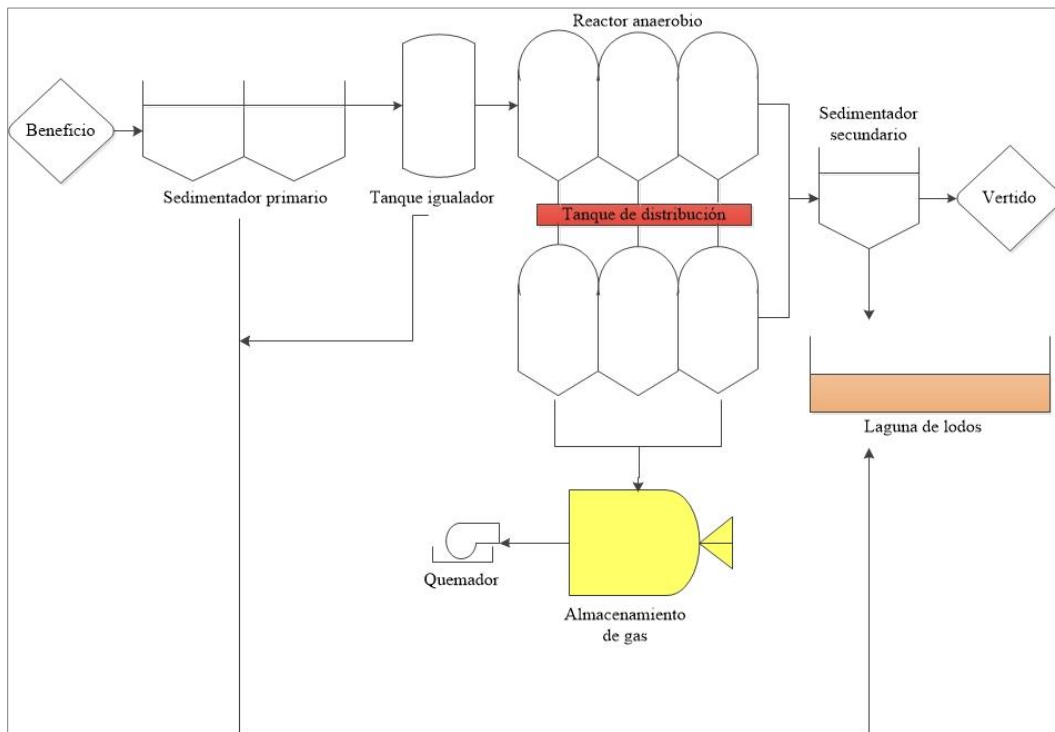
| INFORMACIÓN GENERAL LA EVA S.A. | | |
|---|----------------------|--------------------------|
| Ubicación | Provincia | Alajuela |
| | Cantón | Valverde Vega |
| | Distrito | Sarchí Norte |
| Coordenadas Geográficas | Latitud | 10°05'46,34" N |
| | Longitud | 84°20'54,89" O |
| Altura (msnm) | | 1018 |
| Región cafetalera | | Valle Central Occidental |
| Estadío maduración zona productiva | | Mediana |
| Período aproximado de cosecha | | Setiembre - Marzo |
| Capacidad de procesamiento (fan/cosecha) | | 70 000 |
| Fanegas procesadas | Período 14-15 | 80 000* |
| | Período 15-16 | 65 096,1 |
| | Período 16-17 | 50 295,53 |
| Consumo aproximado de agua por fanega procesada (m³/fanega) | | 0,075 |
| Sistema de tratamiento de aguas residuales | | Reactor anaerobio |

*Dato aproximado

Apéndice 30. Puntos de muestreo realizados en el Beneficio La Eva.



Apéndice 31. Diagrama de flujo del STAR del Beneficio La Eva.



Apéndice 32. Imagen donde se aprecian dos de los puntos de muestreo, en el reactor anaerobio del sistema de tratamiento de aguas residuales del Beneficio La Eva, en enero del 2017.



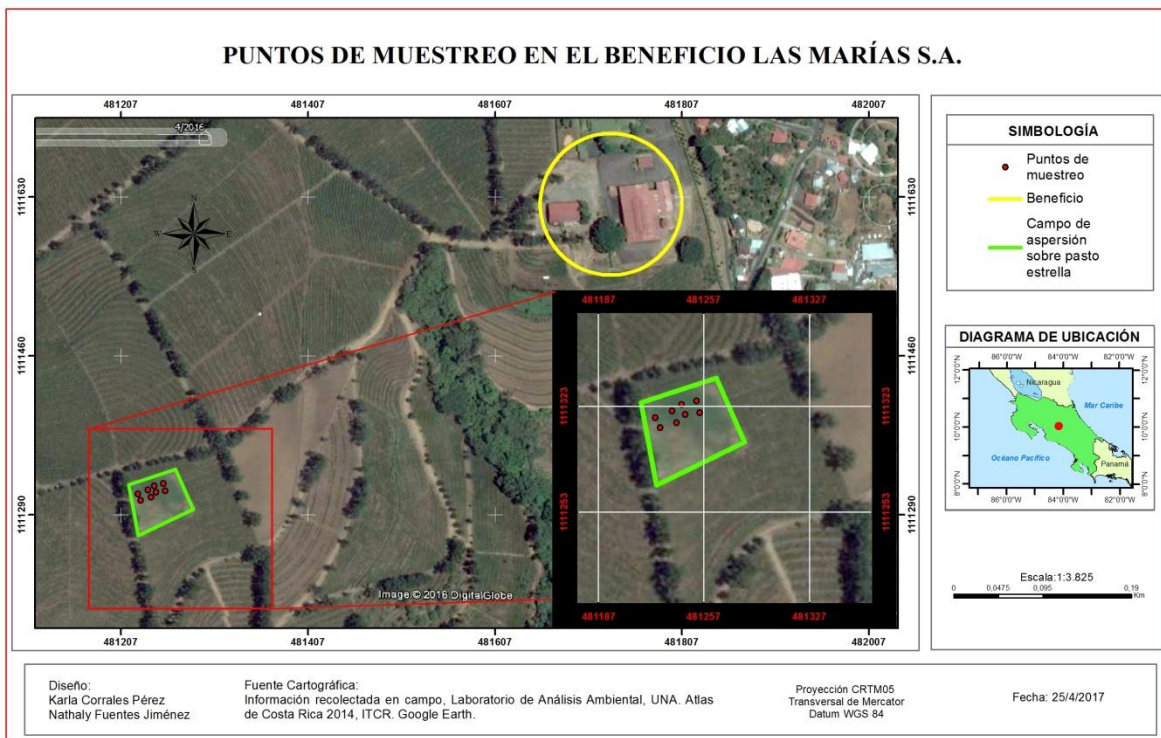
7.9. Beneficio Las Marías

Apéndice 33. Información general del Beneficio Las Marías.

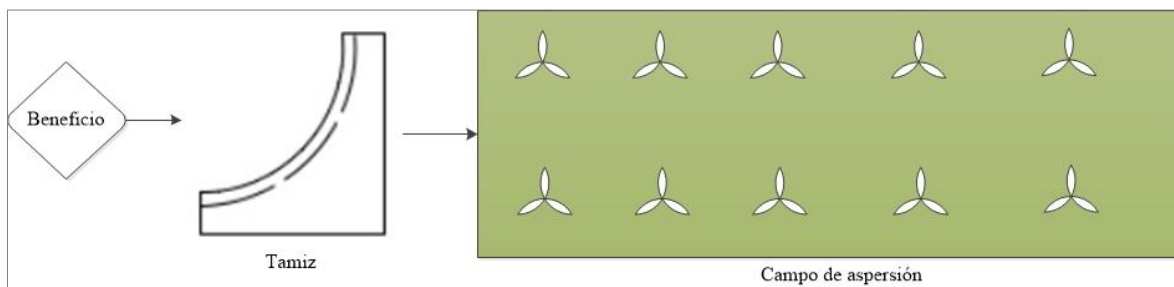
| INFORMACIÓN GENERAL BENEFICIO LAS MARÍAS S.A. | | |
|---|----------------------|--------------------------------|
| Ubicación | Provincia | Heredia |
| | Cantón | Santa Bárbara |
| | Distrito | Purabá |
| Coordenadas Geográficas | Latitud | 10°03'10,79" N |
| | Longitud | 84°09'59,15" O |
| Altura (msnm) | | 1279 |
| Región cafetalera | | Valle Central |
| Estadío maduración zona productiva | | Mediana |
| Período aproximado de cosecha | | Octubre - Febrero |
| Capacidad de procesamiento (fan/cosecha) | | 20 000 |
| Fanegas procesadas | Período 14-15 | 8 000* |
| | Período 15-16 | 12 100 |
| | Período 16-17 | 10 700 |
| Consumo aproximado de agua por fanega procesada (m³/fanega) | | 0,13 |
| Sistema de tratamiento de aguas residuales | | Aspersión sobre pasto estrella |

* Dato aproximado

Apéndice 34. Puntos de muestreo realizados en el Beneficio Las Marías.



Apéndice 35. Diagrama de flujo del STAR del Beneficio Las Marías.



Apéndice 36. Imagen donde se aprecia uno de los puntos del muestreo realizado en el campo de aspersión sobre pasto estrella, en el Beneficio Las Marías, en enero del 2017.



7.10. Beneficio Café de Altura de San Ramón Especial.

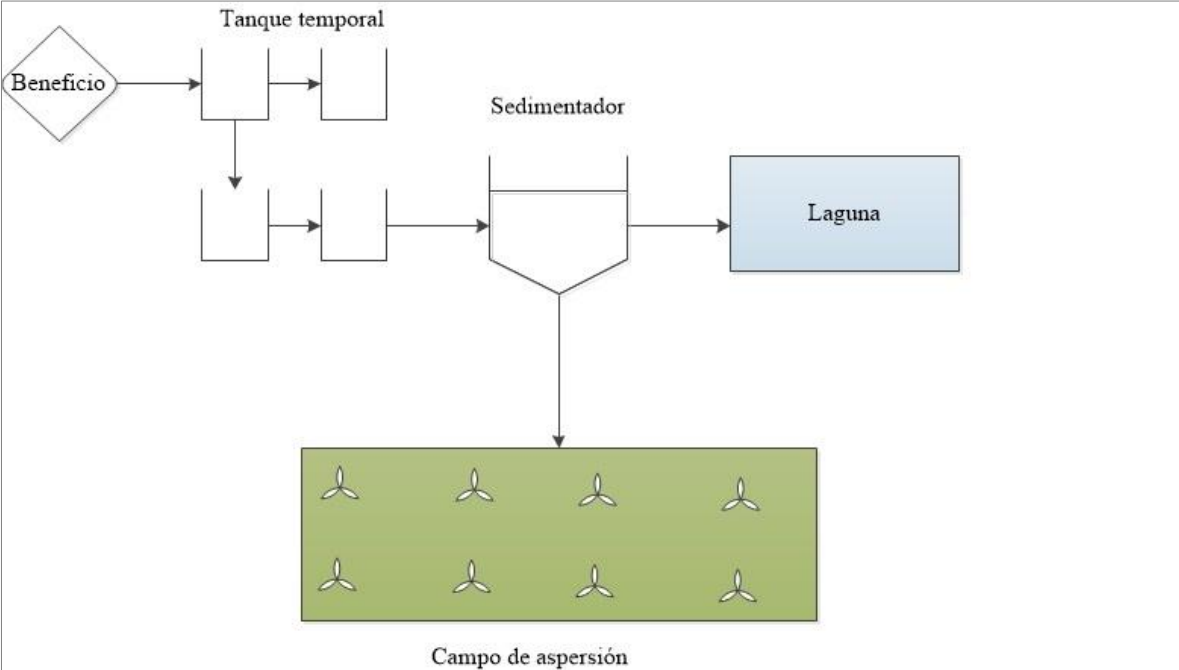
Apéndice 37. Información general del Beneficio Café de Altura de San Ramón Especial S.A.

| INFORMACIÓN GENERAL BENEFICIO CAFÉ DE ALTURA DE SAN RAMÓN ESPECIAL S.A. | | |
|--|----------------------|--|
| Ubicación | Provincia | Alajuela |
| | Cantón | San Ramón |
| | Distrito | San Isidro |
| Coordenadas Geográficas | Latitud | 10°04'51,09" N |
| | Longitud | 84°27'38,95" O |
| Altura (msnm) | | 1023 |
| Región cafetalera | | Valle Central Occidental |
| Estadío maduración zona productiva | | Mediana |
| Período aproximado de cosecha | | Noviembre - Marzo |
| Capacidad de procesamiento (fan/cosecha) | | 90 000-100 000 |
| Fanegas procesadas | Período 14-15 | 98 195 |
| | Período 15-16 | 115 996,21 |
| | Período 16-17 | 81 949.74 |
| Consumo aproximado de agua por fanega procesada (m³/fanega) | | 0,14 |
| Sistema de tratamiento de aguas residuales | | Aspersión sobre pasto estrella /Laguna anaerobia |

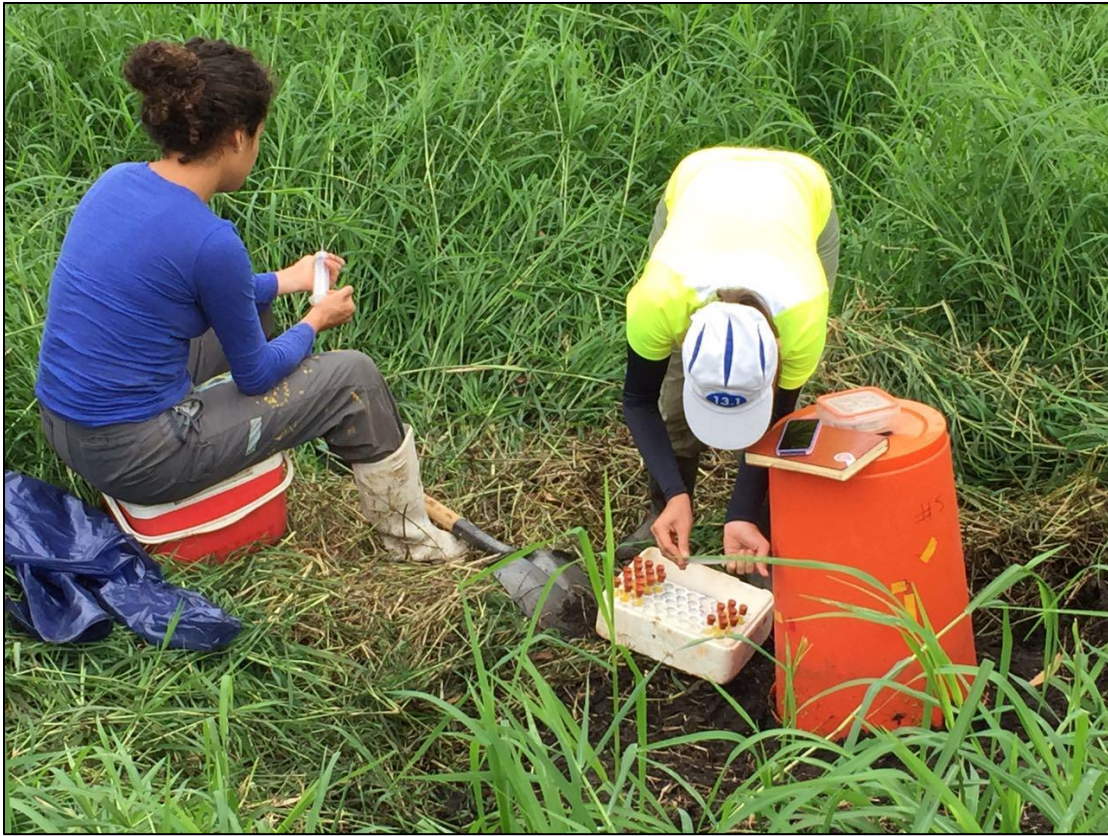
Apéndice 38. Puntos de muestreo realizados en el Beneficio Café de Altura de San Ramón Especial S.A.



Apéndice 39. Diagrama de flujo del STAR del Beneficio Café de Altura.



Apéndice 40. Imagen que ilustra el momento de la toma de una muestra, en el campo de aspersión sobre pasto estrella del Beneficio Café de Altura de San Ramón Especial, en octubre del 2016.



7.11. Factores de emisión

Apéndice 41. Factores de emisión de los STAR estudiados.

| STAR | Beneficio | Factores de emisión | | | | | | | | |
|---------------------------------------|---------------------------|-------------------------|-------|----------|-------------------------|------|----------|--------------------------|------|----------|
| | | CH ₄ (kg/ff) | | | CO ₂ (kg/ff) | | | N ₂ O (mg/ff) | | |
| | | Factor | ± | Promedio | Factor | ± | Promedio | Factor | ± | Promedio |
| Lagunas anaerobias | Santa Rosa S.A. | 0,21 | 0,01 | 0,7 | 0,11 | 0,01 | 0,9 | 6,69 | 0,39 | 14,8 |
| | CoopAgri R.L. | 1,09 | 0,06 | | 1,33 | 0,08 | | 22,06 | 0,93 | |
| | CoopAtenas R.L. | 0,68 | 0,04 | | 1,33 | 0,07 | | 15,77 | 0,73 | |
| Reactores anaerobios | CooproNaranjo R.L. | 13 | 1 | 16,7 | 16 | 2 | 18,0 | 2378 | 215 | 1372,8 |
| | La Eva S.A. | 21 | 2 | | 21 | 2 | | 367 | 23 | |
| Aspersión sobre pasto estrella | CoopTarrazú R.L. | 0,11 | 0,01 | 0,1 | 0,76 | 0,06 | 0,8 | 16856 | 1692 | 5022,4 |
| | Hnos. Vargas Hidalgo S.A. | 0,017 | 0,002 | | 0,38 | 0,03 | | 2005 | 201 | |
| | Las Marías S.A. | 0,054 | 0,004 | | 0,85 | 0,06 | | 976 | 96 | |
| | Café de Altura S.A. | 0,23 | 0,02 | | 1,02 | 0,05 | | 253 | 23 | |

7.12. Viabilidad

Apéndice 42. Ejemplo del cuestionario aplicado a los Beneficios para el análisis de viabilidad.

A continuación se muestra la información que aún no poseemos y que ayudaría sobremanera a completar la base de datos de este Beneficio; esto para poder realizar un análisis más completo, de los resultados obtenidos en este estudio.

Favor completar los espacios en blanco. En caso de que no conocer el dato, favor marcar el paréntesis de "No lo conozco". Y si conoce a alguien que sí posea esa información, puede anotar el nombre de esa persona.

1. **¿En qué año se implementó el actual Sistema de tratamiento de aguas residuales en el Beneficio? :** _____ . () No lo conozco.

2. **¿Cuál fue el costo de construcción e implementación del actual Sistema de tratamiento de aguas residuales del Beneficio?:** _____ . () No lo conozco.

3. **¿Cuál es aproximadamente el costo anual de mantenimiento del STAR?:** _____ . () No lo conozco.

4. **¿Cuáles subproductos son tratados en el sistema de tratamiento de aguas residuales?**
() Aguas mieles
() Lixiviado de broza

- Aguas de proceso
- No lo conozco
- Otro. Especifique: _____.

5. ¿Cómo trasladan las aguas residuales del Beneficio al lugar de tratamiento?

- Gravedad
- Bombeo
- Otro: _____.
- No lo conozco

6. ¿Cuál es el tiempo de residencia del agua en el STAR?

Sedimentador primario: _____. No lo conozco.

Laguna: _____. No lo conozco.

Reactor anaerobio: _____. No lo conozco.

Sedimentador secundario: _____. No lo conozco.

7. ¿Cuál es el tiempo total de residencia del agua en el STAR (tiempo que dura 1m³ de agua desde que ingresa a la primera unidad del sistema de tratamiento, hasta que sale del sistema)?: _____. No lo conozco.

8. **¿Cuál es la capacidad instalada del Sistema de tratamiento de aguas residuales?**
(Cantidad máxima de agua o de carga orgánica, que puede tratar el sistema por
unidad de tiempo): _____ . () No lo conozco.
9. **¿Cuál es la cantidad aproximada actual de carga orgánica entrante al STAR?:**
_____ . () No lo conozco.
10. **¿Cuál es el porcentaje (%) de eficiencia para el que fue diseñado el sistema de
tratamiento de aguas residuales del Beneficio?:** _____ . ()
No lo conozco.
11. **¿Qué condiciones deben ser controladas en el STAR, que pueden afectar la
eficiencia del sistema? (Por ejemplo, pH del agua):**

_____. () No lo conozco.
12. **¿Al sistema de tratamiento se le agrega algún producto para mejorar el proceso,
como cal o microorganismos? Especifique cuál y dónde:**
_____. () No lo
conozco.

13. ¿Utilizan algún producto para ahuyentar las moscas dentro del sistema de tratamiento de aguas residuales? ¿Cuál?: _____ . () No lo conozco.

14. ¿A dónde es depositado el vertido del STAR?

() Río o quebrada

() Suelo

() No hay vertido

() No lo conozco

() Otro. Especifique: _____ .

15. ¿Se realiza alguna extracción de lodos del STAR? ¿De cuál unidad?:

_____. () No lo conozco.

16. ¿Cuáles son los principales lugares o zonas de donde proviene el café procesado en el _____ Beneficio?:

_____.
() No lo conozco.

17. ¿Qué tipo de herbicidas, plaguicidas y fertilizantes son aplicados en las fincas pertenecientes _____ al _____ Beneficio?:

_____. () No lo conozco.

18. ¿Cuál es el consumo eléctrico (kWh) generado por el uso del sistema de tratamiento de aguas residuales del Beneficio? *(En caso de no conocer el del STAR, puede colocar el perteneciente a todo el Beneficio, en indicar que pertenece a éste):*

_____. () No lo conozco.

19. ¿De dónde es tomada la energía que se utiliza para el procesamiento del café en el Beneficio?: _____ () No lo conozco.

20. ¿Qué combustibles se utilizan en el procesamiento de café en el Beneficio y en qué etapas?:

_____. () No lo conozco.

21. ¿De dónde es tomada el agua que se utiliza para el procesamiento del café en el Beneficio (río, pozo, acueducto, etc.)? : _____ () No lo conozco.

22. ¿Cuántas personas son necesarias para la operación y mantenimiento del sistema de tratamiento de aguas residuales?: _____ . () No lo conozco.

23. ¿Cuál sería el costo y la duración de la capacitación para la persona que se deba hacer cargo de la operación del STAR?:

Costo _____ . () No lo conozco.

Duración: _____ . () No lo conozco.

24. ¿Cuál es aproximadamente el salario mensual de quien se encarga de operar el STAR?

- () Menor a 200mil colones
- () Entre 200mil - 300mil colones
- () Entre 300mil – 400mil colones
- () Entre 400mil - 500mil colones
- () Mayor a 500mil colones
- () No lo conozco

----- *Fin del cuestionario* -----

Apéndice 43. Información recopilada a partir de las respuestas del cuestionario para el análisis de la viabilidad.

| VARIABLE | BENEFICIOS DE CAFÉ | | | | | | | | |
|---|---|---|-------------------------|---|-------------------------|---|-------------------------|---|--------------------|
| | Café de altura | CoopeAgri | Coopeatenas | CoopeTarrazú | CooproNaranja | Hermanos Vargas | La Eva | Las Marías | Santa Rosa |
| STAR | Aspersión sobre pasto estrella/Laguna anaerobia | Lagunas anaerobias/Aspersión sobre pasto estrella | Lagunas anaerobias | Aspersión sobre pasto estrella | Reactor anaerobio | Aspersión sobre pasto estrella | Reactor anaerobio | Aspersión sobre pasto estrella | Lagunas anaerobias |
| Capacidad de procesamiento (fan/cosecha) | 90000 a 10000 | 240000 | 60000 | 265000 | 110000 | 4500 | 70000 | 20000 | 40000 a 45000 |
| Consumo de agua (m3/fan) | 0,14 | 0,389 | 0,264 | 0,22 | 0,288 | 0,0045 | 0,075 | 0,13 | 0,325 |
| Unidades de tratamiento | Tanque temporal | Lagunas (1-4) | Tanque temporal | Tanque temporal | Sedimentador primario | Tanquetas sedimentadoras | Sedimentador primario | Campo de aspersión sobre pasto estrella | Sedimentador |
| | Sedimentador | Lagunas (5-9) | Sedimentador primario | Campo de aspersión sobre pasto estrella | Laguna | Campo de aspersión sobre pasto estrella | Tanque igualador | N.A. | Laguna 1 |
| | Laguna | Campo de riego | Tanque igualador | N.A. | Reactor anaerobio | N.A. | Reactor anaerobio | N.A. | Laguna 2 |
| | Aspersión | N.A. | Sedimentador secundario | N.A. | Sedimentador secundario | N.A. | Sedimentador secundario | N.A. | Laguna 3 |
| | N.A. | N.A. | Lagunas | N.A. | N.A. | N.A. | Laguna de lodos | N.A. | Lecho de lodos |

| VARIABLE | BENEFICIOS DE CAFÉ | | | | | | | | |
|--|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|--------------------|--------------------|---------------------|--------------------|
| | Café de altura | CoopeAgri | Coopeatenas | CoopeTarrazú | CooproNaranjo | Hermanos Vargas | La Eva | Las Marías | Santa Rosa |
| | N.A. | N.A. | Lecho de lodos | N.A. | N.A. | N.A. | N.A. | N.A. | N.A. |
| Área total de emisión (m2) | 30732 | 34210 | 4759 | 100007 | 919 | 603 | 378 | 3500 | 1429 |
| Reporte operacional en vertido | No | Sí | Sí | No | Sí | No | Sí | No (se hace previo) | Sí |
| Año implementación STAR | 2014 | 2004 | 1996 | 2014 | 1992 | 2002 | 2007 | 2009 | 1998 |
| Costo construcción e implementación STAR | ¢20.000.000 | N.I. | ¢30.000.000 | ¢120.000.000 | ¢90.000.000 | ¢600.000 | ¢375.000.000 | ¢3.000.000 | ¢5.000.000 |
| Costo anual de mantenimiento | ¢2.000.000 | ¢11.000.000 | ¢8.000.000 | ¢20.000.000 | ¢4.000.000 | ¢100.000 | ¢1.300.000 | Bajo | ¢2.500.000 |
| Subproductos tratados en el STAR | Aguas mieles | Aguas mieles | Aguas mieles | Aguas mieles | Aguas mieles | Aguas mieles | Aguas mieles | Aguas mieles | Aguas mieles |
| | Lixiviado de broza | Aguas de proceso | Lixiviado de broza | Lixiviado de broza | Lixiviados de broza | Lixiviado de broza | Lixiviado de broza | Aguas de proceso | Lixiviado de broza |
| | Aguas de proceso | Lixiviado de pulpa | Aguas de proceso | Aguas de proceso | Aguas de proceso | Aguas de proceso | Aguas de proceso | N.A. | Aguas de proceso |
| Método de traslado de aguas al STAR | Bombeo | Bombeo | Gravedad | Bombeo | Gravedad | Gravedad y bombeo | Gravedad | Bombeo | Gravedad |
| Tiempo retención | 5 horas aprox | N.A. | N.I. | 10 horas | N.A. | 24 horas | N.A. | N.I. | N.A. |

| VARIABLE | BENEFICIOS DE CAFÉ | | | | | | | | |
|--|--------------------|-----------|----------------------------------|--------------|---------------|-----------------|---------|------------|-------------------------|
| | Café de altura | CoopeAgri | Coopeatenas | CoopeTarrazú | CooproNaranja | Hermanos Vargas | La Eva | Las Marías | Santa Rosa |
| hidráulica en tanque temporal | | | | | | | | | |
| Tiempo de retención hidráulica Sedimentador primario | 3 horas aprox | N.A. | 1 día | N.A. | 24 horas* | N.A. | 6 horas | N.A. | N.I. |
| Tiempo de retención hidráulica Laguna | 1 mes aprox* | N.I. | 9 días (Laguna 1), 12 (Laguna 2) | N.A. | 96 horas* | N.A. | N.A. | N.A. | 24 horas en cada laguna |
| Tiempo de retención hidráulica Aspersión | 4 a 7 horas | N.I. | N.A. | N.I. | N.A. | N.I. | N.A. | N.A. | N.A. |
| Tiempo de retención hidráulica Tanque igualador | N.A. | N.A. | 7 días | N.A. | N.A. | N.A. | 6 horas | N.A. | N.A. |
| Tiempo de retención hidráulica Reactor anaerobio | N.A. | N.A. | N.A. | N.A. | 120 horas* | N.A. | 8 horas | N.A. | N.A. |
| Tiempo de retención | N.A. | N.A. | 2 días c/u | N.A. | 1 hora* | N.A. | 8 horas | N.A. | N.A. |

| VARIABLE | BENEFICIOS DE CAFÉ | | | | | | | | |
|--|--------------------|-----------|-------------|--------------|---------------|-----------------|---|------------|------------|
| | Café de altura | CoopeAgri | Coopeatenas | CoopeTarrazú | CooproNaranjo | Hermanos Vargas | La Eva | Las Marías | Santa Rosa |
| hidráulica Sedimentador secundario | | | | | | | | | |
| Tiempo de retención hidráulica Lecho de lodos | N.A. | N.A. | 2 años | N.A. | N.A. | N.A. | El lodo se mantiene durante toda la cosecha y al finalizar se retira todo el lodo almacenado. | N.A. | N.A. |
| Tiempo total de retención hidráulica del agua en el STAR (tiempo que dura 1m3 de agua desde que ingresa hasta que sale del STAR) | 10 horas | 15 días | 30 días | N.C. | 10 días* | 24 a 48 horas | 10m3 duran 16 horas | N.I. | N.C. |

| VARIABLE | BENEFICIOS DE CAFÉ | | | | | | | | |
|---|---|--|---|----------------------------------|---|--|--|---|---|
| | Café de altura | CoopeAgri | Coopeatenas | CoopeTarrazú | CooproNara njo | Hermanos Vargas | La Eva | Las Marías | Santa Rosa |
| Capacidad instalada del STAR (m ³ /m ²) | El agua de 3mil fan/Ha durante un período de 90 días con un consumo de 0,141 m ³ /fan (0,0423 m ³ /m ²) | 80000m ³ (2,3385 m ³ /m ²) | 1000 m ³ (0,21013 m ³ /m ²) | 11m ³ /m ² | 300 m ³ /día con DQO de 20000 ppm** (3,2644 m ³ /m ²) | N.I. Se usa (0,0017 m ³ /m ²) | 100 m ³ /día (0,0177 m ³ /m ²) | 54 m ³ /día (0,0154 m ³ /m ²) | N.C. |
| | 0,0423 | 2,3385 | 0,21013 | 11 | 3,2644 | 0,0017 | 0,0177 | 0,0154 | 0 |
| Carga orgánica de entrada al STAR | 1733 mg/l DBO, 42 506 mg/l DQO | De 15000 a 20000 mg/L DQO | 3000 mg/L DQO | N.C. | 200 m ³ /día con DQO 20000 ppm*** | N.C. | 8500 mg/L DQO | 20000 mg/L | Entre 0,25m ³ /ff y 0,35m ³ /ff |
| % de Eficiencia de diseño | 100% en vertido y 85% en pozos de monitoreo. | 85 N.A. 90% | 95% | N.C. | 96 a 98% | N.C. | 85% | N.I. | 100% |
| Condiciones que deben ser controladas en STAR, que afectar eficiencia | Aplicación de microorganismos, debido a que el sistema es 100% biológico. | DBO | pH | Carga de sólidos | DQO | pH | pH | No saturar el sistema | pH |

| VARIABLE | BENEFICIOS DE CAFÉ | | | | | | | | |
|---|---|-----------------|--------------------|---|--|-----------------|--|----------------------------|---|
| | Café de altura | CoopeAgri | Coopeatenas | CoopeTarrazú | CooproNarajo | Hermanos Vargas | La Eva | Las Marías | Santa Rosa |
| | Control de mosca | DQO | Bacterias | Distribución uniforme de las aguas mieles | Sólitos totales | Sólidos | Temperatura del agua | Eficiencia en uso del agua | N.A. |
| | Tiempo de riego | pH | Aplicación de soda | N.A. | Temperatura | Aceites | Sólidos sedimentables | N.A. | N.A. |
| | Tamizado de las aguas | N.A. | N.A. | N.A. | Caudal | N.A. | Caudal afluente | N.A. | N.A. |
| Producto agregado al STAR para mejorar proceso | Microorganismos en las primeras pilas y en los patios de riego. | Microorganismos | Soda y bacteria | No | Hidróxido de calcio en reactor. Bacteria (MECA) en laguna. | Cal | No se le agrega porque se le realizó un proceso de adaptación bacteriana para que no sea necesario | Cal | Cal en dosificador. Microorganismos en sistema de agua. |

| VARIABLE | BENEFICIOS DE CAFÉ | | | | | | | | |
|---|--|----------------|----------------|---|----------------|------------------------|----------------|---------------|----------------|
| | Café de altura | CoopeAgri | Coopeatenas | CoopeTarrazú | CooproNaranjo | Hermanos Vargas | La Eva | Las Marías | Santa Rosa |
| Utilización de producto para ahuyentar moscas dentro del STAR | Control biológico (Spalangia pachicrípoides y microorganismos) y trampas | No | No | Stomoxys, Malla perimetral con atrayentes e insecticida, fumigaciones | No | No | No | No | Insecticida |
| Sitio de depósito del vertido | Suelo | Río o quebrada | Río o quebrada | Suelo | Río o quebrada | Suelo | Río o quebrada | Suelo | Río o quebrada |
| | No hay vertido | N.A. | N.A. | N.A. | N.A. | N.A. | N.A. | N.A. | N.A. |
| Zonas o lugares de donde proviene el café procesado en el Beneficio | San Ramón | N.I. | Atenas | Tarrazú | Naranjo | San Isidro de Alajuela | Tarrazú | Barva | N.A. |
| | Tarrazú | N.A. | Puriscal | León Cortez | Valverde Vega | Sabanilla de Alajuela | Cartago | Santa Bárbara | Santa Teresita |
| | Alajuela | N.A. | Turrubares | Desamparados | San Ramón | N.A. | Alajuela | N.A. | La Suiza |
| | Miramar | N.A. | N.A. | Cartago | N.A. | N.A. | Poás | N.A. | N.A. |
| | N.A. | N.A. | N.A. | Acosta | N.A. | N.A. | Grecia | N.A. | N.A. |
| | N.A. | N.A. | N.A. | N.A. | N.A. | N.A. | Sarchí | N.A. | N.A. |
| | N.A. | N.A. | N.A. | N.A. | N.A. | N.A. | Naranjo | N.A. | N.A. |
| | N.A. | N.A. | N.A. | N.A. | N.A. | N.A. | San Ramón | N.A. | N.A. |

| VARIABLE | BENEFICIOS DE CAFÉ | | | | | | | | |
|---|--------------------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------|-------------------|---|-------------------------------------|--------------|--|
| | Café de altura | CoopeAgri | Coopeatenas | CoopeTarrazú | CooproNaranjo | Hermanos Vargas | La Eva | Las Marías | Santa Rosa |
| Herbicidas, plaguicidas o fertilizantes aplicados en la finca que pertenece al Beneficio | No se aplican | N.I. | N.I. | N.C. | N.A. | Glifosato, abono químico y foliares, fungicidas | N.I. | N.I. | Fórmula completa, quemantes y preemergente |
| Consumo eléctrico del STAR | 10,24 kWh/fan para todo el Beneficio | N.I. | No usa* | N.C. | 15000 kWh/cosecha | 1 Motor de 1/2 HP, una hora al día | 23 kWh | 5 kWh | 3 motores de 5hp por 5 horas |
| Fuente de energía para procesar el café | ICE | ICE | ICE | CoopeSantos | ICE | ICE | ICE | CNFL | Energía comprada |
| Combustibles usados en procesamiento y etapas en los que se usa | Electricidad | Leña | Gasolina | Leña | Leña | Leña | Leña | Leña | Leña |
| | Leña | Cascarilla | Diésel | Cascarilla | Cascarilla | Cascarilla | Cascarilla | Cascarilla | Cascarilla |
| | Hornos de presecado y secado | N.A. | N.A. | N.A. | N.A. | N.A. | Se usa en presecado y Biogás secado | N.A. | N.A. |
| Fuente de agua para procesamiento de café | Pozo | Reservorios de agua llovida | Concesión de aguas Río Cacao | Concesión de río | Pozo | Concesión acequia. | Río Trojas | Río Ciruelas | Río Aquiares |
| Personal requerido para | 2,5 | 2,5 | 1 | 5 | 2 | 0,5 | 2,5 | 0,5 | 0,5 |

| VARIABLE | BENEFICIOS DE CAFÉ | | | | | | | | |
|---------------------------------------|--|--|--|-----------------|---|--|-------------------|--|-----------------|
| | Café de altura | CoopeAgri | Coopeatenas | CoopeTarrazú | CooproNarajno | Hermanos Vargas | La Eva | Las Marías | Santa Rosa |
| operar STAR | | | | | | | | | |
| Costo de capacitación para el puesto | Recurso propio | N.C. | Sin costo | N.C. | N.C. | 10000 | 575000 | N.R. | 9822,02 |
| Duración de capacitación | 2 días | 1 año | N.I. | 1 mes | N.C. | 2 horas | 30 días | 3 días | 1 día |
| Salario mensual de encargado del STAR | 200mil a 300mil | 300mil a 400mil* | 400mil a 500mil | 300mil a 400mil | 200mil a 300mil | 300mil a 400mil | 300milN.A. 400mil | N.I.** | 200mil a 300mil |
| Notas | *Dependiendo de la cantidad de aguas que lleguen, se va aspersando lo que haya en la laguna. Por ende no hay un tiempo definido realmente. | Indica que el vertido va a un río pero también que tiene campo de aspersión. *No hay un encargado específico del STAR. | *El STAR trabaja por gravedad. La del Beneficio es de 186 900 kWh. | N.A. | *Tiempos de retención aproximada en el pico de cosecha. **Puede descomponer carga orgánica que consuma 6000 kg de oxígeno por día. ***Aproximadamente 4000 kg | *Un motor de 1/2 HP 1 hora/día. **Para el tractor. | N.A. | *En poca cantidad para limpieza de tubería. **No hay una persona asignada al STAR. Por ratos algún peón lo revisa y da mantenimiento. El agua del canal perimetral | N.A. |

| VARIABLE | BENEFICIOS DE CAFÉ | | | | | | | | |
|----------|--------------------|-----------|-------------|--------------|--|-----------------|--------|------------------------------|------------|
| | Café de altura | CoopeAgri | Coopeatenas | CoopeTarrazú | CooproNaranja | Hermanos Vargas | La Eva | Las Marías | Santa Rosa |
| | | | | | O ₂ /día. El sed. Primario y la laguna se limpian después de cosecha. | | | se usa para irrigar caminos. | |

Significado: N.A.: No aplica, N.I.: No hay información, N.C.: No conoce, N.R.: No responde.

Apéndice 44. Validación de la importancia de las variables para el análisis de viabilidad.

| Fases | Variables relevantes | BENEFICIOS DE CAFÉ | | | | | | | | | | | | Promedio | Porcentaje |
|----------------------------|--------------------------|--------------------|---------------|----------------|---------------|------------------|-----------------|----------------------|---------------|---------------------|---------------|--------------------|-------------------|----------|------------|
| | | Cristian Chavarría | Marc o Alfaro | Hugo Sanch o | César Zamora | Roger Matam oros | Jorge Ulate | William Vargas | Roy Solís | Juan Rafael Murillo | Arman do Jara | Esteban Zamora | Martín Cecilian o | | |
| | | Coope Atenas | La Eva | Café de Altura | Coope Tarrazú | Coope Agri | Coopro Naranj o | Hnos. Vargas Hidalgo | San Jeróni mo | PAGUA | Aquiar es | La Cruz de Tarrazú | Río Conejo | | |
| Fase I. Viabilidad Técnica | Área requerida | 3 | 1 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2,833 | 4,052 |
| | Capacidad de tratamiento | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3,000 | 4,291 |
| | Nivel de tratamiento | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 3 | 2 | 3 | 3 | 2 | 3 | 3 | 2,667 | 3,814 |
| | Eficiencia de | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 3 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2,833 | 4,052 |

| Fases | Variables relevantes | BENEFICIOS DE CAFÉ | | | | | | | | | | | | Promedio | Porcentaje |
|-------|--|--------------------|---------------|----------------|---------------|-----------------|-----------------|----------------------|--------------|---------------------|--------------|--------------------|------------------|----------|------------|
| | | Cristian Chavarría | Marc o Alfaro | Hugo Sanch o | César Zamora | Roger Matamoros | Jorge Ulate | William Vargas | Roy Solís | Juan Rafael Murillo | Armando Jara | Esteban Zamora | Martín Ceciliano | | |
| | | Coope Atenas | La Eva | Café de Altura | Coope Tarrazú | Coope Agri | Coopro Naranj o | Hnos. Vargas Hidalgo | San Jerónimo | PAGUA | Aquiaries | La Cruz de Tarrazú | Río Conejo | | |
| | remoción | | | | | | | | | | | | | | |
| | Manejo de lodos | 2 | 1 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 1 | 2 | 2,167 | 3,099 |
| | Flexibilidad al cambio de características del afluente | 2 | 3 | 2 | 3 | 3 | 3 | 1 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2,667 | 3,814 |
| | Replicabilidad | 2 | 1 | 2 | 3 | 2 | 1 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2,333 | 3,337 |
| | Cumplimiento de legislación y normas | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3,000 | 4,291 |
| | Personal requerido | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2,750 | 3,933 |
| | Capacitación personal | 2 | 1 | 2 | 3 | 2 | 3 | 2 | 3 | 2 | 2 | 3 | 3 | 2,333 | 3,337 |
| | Tiempo de retención hidráulica | 3 | 1 | 3 | 3 | 2 | 3 | 1 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2,417 | 3,456 |
| | Mantenimiento caract. Deseadas | 2 | 3 | 3 | 2 | 3 | 3 | 2 | 3 | 3 | 3 | 1 | 3 | 2,583 | 3,695 |
| | Traslado de aguas de beneficio al STAR | 2 | 1 | 3 | 3 | 2 | 3 | 2 | 3 | 2 | 3 | 3 | 3 | 2,500 | 3,576 |

| Fases | Variables relevantes | BENEFICIOS DE CAFÉ | | | | | | | | | | | | Promedio | Porcentaje |
|-------------------------------|--|--------------------|---------------|----------------|---------------|------------------|-----------------|----------------------|---------------|---------------------|---------------|--------------------|-------------------|----------|------------|
| | | Cristian Chavarría | Marc o Alfaro | Hugo Sanch o | César Zamora | Roger Matam oros | Jorge Ulate | William Vargas | Roy Solís | Juan Rafael Murillo | Arman do Jara | Esteban Zamora | Martín Cecilian o | | |
| | | Coope Atenas | La Eva | Café de Altura | Coope Tarrazú | Coope Agri | Coopro Naranj o | Hnos. Vargas Hidalgo | San Jeróni mo | PAGUA | Aquiar es | La Cruz de Tarrazú | Río Conejo | | |
| Fase II. Viabilidad económica | Costo de construcción e implementación | 3 | 3 | 3 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2,833 | 4,052 |
| | Costo por consumo energético | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2,917 | 4,172 |
| | Costo pre-tratamiento de las aguas | 2 | 1 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 3 | 2 | 3 | 2 | 3 | 2,417 | 3,456 |
| | Costo asociado al personal | 3 | 2 | 2 | 3 | 2 | 3 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2,667 | 3,814 |
| | Costo de mantenimiento | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2,833 | 4,052 |
| | Beneficios económicos de la implementación | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 3 | 2,833 | 4,052 |
| Fase III. Viabilidad | Ahorro de combustibles fósiles | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 1 | 3 | 2,750 | 3,933 |

| Fases | Variables relevantes | BENEFICIOS DE CAFÉ | | | | | | | | | | | | Promedio | Porcentaje |
|------------|--|--------------------|---------------|----------------|---------------|------------------|-----------------|----------------------|---------------|---------------------|---------------|--------------------|-------------------|----------|------------|
| | | Cristian Chavarría | Marc o Alfaro | Hugo Sanch o | César Zamora | Roger Matam oros | Jorge Ulate | William Vargas | Roy Solís | Juan Rafael Murillo | Arman do Jara | Esteban Zamora | Martín Cecilian o | | |
| | | Coope Atenas | La Eva | Café de Altura | Coope Tarrazú | Coope Agri | Coopro Naranj o | Hnos. Vargas Hidalgo | San Jeróni mo | PAGUA | Aquiar es | La Cruz de Tarrazú | Río Conejo | | |
| Ambient al | Posibles impactos ambientales | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3,000 | 4,291 |
| | Atracción de vectores de enfermedades | 3 | 1 | 2 | 3 | 3 | 3 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2,667 | 3,814 |
| | Eficiencia en el uso del recurso hídrico | 2 | 1 | 3 | 3 | 3 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2,667 | 3,814 |
| | Entorno ecológico | 2 | 1 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 3 | 3 | 3 | 2 | 3 | 2,583 | 3,695 |
| | Emisión de GEI al aire | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3,000 | 4,291 |
| | Efluente del tratamiento | 2 | 3 | 2 | 3 | 3 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2,667 | 3,814 |
| | TOTAL | | | | | | | | | | | | 69,917 | 100,000 | |

Nota: La calificación responde a la pregunta: ¿Qué tan importante son para usted las siguientes variables, a la hora de decidir implementar un STAR? Significado: 1: Poca importancia; 2: Importancia media; 3: Mucha importancia.

Apéndice 45. Matriz de viabilidad técnica, económica y ambiental de los STAR analizados.

| Fases | Factor de importancia | Variables relevantes | Laguna anaerobia | | Reactor anaerobio | | Aspersión sobre pasto estrella | |
|-----------------------------------|-----------------------|--|------------------|------------------|-------------------|------------------|--------------------------------|------------------|
| | | | Puntuación | Puntaje relativo | Puntuación | Puntaje relativo | Puntuación | Puntaje relativo |
| Fase I. Viabilidad Técnica | 4,052 | Área requerida | 2 | 2,702 | 3 | 4,052 | 1 | 1,351 |
| | 14,291 | Capacidad de tratamiento | 1 | 4,764 | 2 | 9,527 | 3 | 14,291 |
| | 3,814 | Nivel de tratamiento | 2 | 2,543 | 2 | 2,543 | 2 | 2,543 |
| | 4,052 | Eficiencia de remoción | 2 | 2,702 | 3 | 4,052 | 1 | 1,351 |
| | 3,099 | Manejo de lodos | 2 | 2,066 | 1 | 1,033 | 3 | 3,099 |
| | 3,814 | Flexibilidad al cambio de características del afluente | 2 | 2,543 | 1 | 1,271 | 3 | 3,814 |
| | 3,337 | Replicabilidad | 2 | 2,225 | 2 | 2,225 | 2 | 2,225 |
| | 14,291 | Cumplimiento de legislación y normas | 3 | 14,291 | 3 | 14,291 | 2 | 9,527 |
| | 3,933 | Personal requerido | 2 | 2,622 | 1 | 1,311 | 3 | 3,933 |
| | 3,337 | Capacitación personal | 1 | 1,112 | 2 | 2,225 | 3 | 3,337 |
| | 3,456 | Tiempos residencia (duración del tratamiento) | 1 | 1,152 | 2 | 2,304 | 3 | 3,456 |
| | 3,695 | Mantenimiento características deseadas | 2 | 2,463 | 2 | 2,463 | 3 | 3,695 |
| | 3,576 | Traslado de aguas de beneficio al STAR | 2 | 2,384 | 3 | 3,576 | 1 | 1,192 |
| | Total | | | 24 | 43,568 | 27 | 50,874 | 30 |
| Fase II. Viabilidad | 4,052 | Costo de construcción e implementación | 2 | 2,702 | 1 | 1,351 | 3 | 4,052 |

| Fases | Factor de importancia | Variables relevantes | Laguna anaerobia | | Reactor anaerobio | | Aspersión sobre pasto estrella | |
|-----------------------------------|-----------------------|--|------------------|------------------|-------------------|------------------|--------------------------------|------------------|
| | | | Puntuación | Puntaje relativo | Puntuación | Puntaje relativo | Puntuación | Puntaje relativo |
| económica | 14,172 | Costo por consumo energético | 2 | 9,448 | 1 | 4,724 | 3 | 14,172 |
| | 3,456 | Costo pre-tratamiento de las aguas | 3 | 3,456 | 2 | 2,304 | 1 | 1,152 |
| | 3,814 | Costo asociado al personal | 2 | 2,543 | 1 | 1,271 | 3 | 3,814 |
| | 4,052 | Costo de mantenimiento | 1 | 1,351 | 3 | 4,052 | 1 | 1,351 |
| | 4,052 | Beneficios económicos de la implementación | 1 | 1,351 | 3 | 4,052 | 2 | 2,702 |
| | Total | | | 11 | 20,850 | 11 | 17,755 | 13 |
| Fase III. Viabilidad Ambiental | 3,933 | Ahorro de combustibles fósiles | 1 | 1,311 | 3 | 3,933 | 1 | 1,311 |
| | 14,291 | Posibles impactos ambientales | 2 | 9,527 | 3 | 14,291 | 1 | 4,764 |
| | 3,814 | Atracción de vectores de enfermedades | 3 | 3,814 | 3 | 3,814 | 1 | 1,271 |
| | 3,814 | Eficiencia en el uso del recurso hídrico | 2 | 2,543 | 1 | 1,271 | 3 | 3,814 |
| | 3,695 | Entorno ecológico | 3 | 3,695 | 2 | 2,463 | 1 | 1,232 |
| | 14,291 | Emisión de GEI | 2 | 9,527 | 1 | 4,764 | 3 | 14,291 |
| | 3,814 | Efluente del tratamiento | 1 | 1,271 | 1 | 1,271 | 3 | 3,814 |
| | Total | | | 14 | 31,689 | 14 | 31,808 | 13 |
| PUNTOS TOTALES | | | 49 | 96,106 | 52 | 100,437 | 56 | 111,553 |

8. ANEXOS

Anexo 1. Tabla para determinar número de puntos de muestreo de acuerdo al área de emisión.

| Superficie del sitio contaminado (hectáreas) | | Número de partes por hectárea | Numero mínimo de puntos de muestreo superficial */ | Número mínimo de pozos verticales |
|--|-------|-------------------------------|--|-----------------------------------|
| De | A | | | |
| 0,1 | 0,19 | | 6 | 3 |
| 0,2 | 0,29 | | 7 | 4 |
| 0,3 | 0,39 | | 8 | 4 |
| 0,4 | 0,49 | | 9 | 5 |
| 0,5 | 0,69 | | 10 | 5 |
| 0,7 | 0,99 | | 11 | 6 |
| 1 | 1,99 | 12 | 12 | 6 |
| 2 | 2,99 | 8 | 17 | 8 |
| 3 | 3,99 | 7 | 21 | 10 |
| 4 | 4,99 | 6 | 24 | 12 |
| 5 | 5,99 | 5 | 27 | 13 |
| 6 | 6,99 | 5 | 29 | 15 |
| 7 | 7,99 | 5 | 32 | 16 |
| 8 | 8,99 | 4 | 34 | 17 |
| 9 | 9,99 | 4 | 36 | 18 |
| 10 | 10,99 | 4 | 38 | 19 |
| 11 | 11,99 | 4 | 40 | 20 |
| 12 | 12,99 | 4 | 42 | 21 |
| 13 | 13,99 | 3 | 43 | 22 |
| 14 | 14,99 | 3 | 45 | 22 |
| 15 | 15,99 | 3 | 46 | 23 |
| 16 | 16,99 | 3 | 48 | 24 |
| 17 | 17,99 | 3 | 49 | 25 |
| 18 | 18,99 | 3 | 51 | 25 |
| 19 | 19,99 | 3 | 52 | 26 |
| 20 | 20,99 | 3 | 54 | 27 |
| 21 | 21,99 | 3 | 55 | 27 |
| 22 | 22,99 | 3 | 56 | 28 |
| 23 | 23,99 | 3 | 58 | 29 |
| 24 | 24,99 | 2 | 59 | 29 |
| 25 | 25,99 | 2 | 60 | 30 |
| 26 | 26,99 | 2 | 61 | 31 |
| 27 | 27,99 | 2 | 62 | 31 |
| 28 | 28,99 | 2 | 63 | 32 |
| 29 | 29,99 | 2 | 65 | 32 |
| 30 | 30,99 | 2 | 66 | 33 |
| 31 | 31,99 | 2 | 67 | 34 |
| 32 | 32,99 | 2 | 68 | 34 |
| 33 | 33,99 | 2 | 69 | 35 |
| 34 | 34,99 | 2 | 70 | 35 |
| 35 | ∞ | 2 | 2 veces el número de ha | Número mínimo de muestras /2 |

Fuente: LAA 2014