



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrado
Maestría en Artes en Energía y Ambiente

**COMPARACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LOS LODOS DESHIDRATADOS
GENERADOS CON UN AGENTE INORGÁNICO Y UNO ORGÁNICO EN UNA PLANTA DE
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES**

Lic. Ferdiner Ulises González Ortíz

Asesorado por el MSc. Lic. Manuel Francisco Cano Alfaro

Guatemala, julio de 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**COMPARACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LOS LODOS DESHIDRATADOS
GENERADOS CON UN AGENTE INORGÁNICO Y UNO ORGÁNICO EN UNA PLANTA DE
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

LIC. FERDINER ULISES GONZÁLEZ ORTÍZ

ASESORADO POR EL MSC. LIC. MANUEL FRANCISCO CANO ALFARO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRO EN ENERGÍA Y AMBIENTE

GUATEMALA, JULIO DE 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Christian Moisés de la Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Armando Cruz Lorente
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Mtra. Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
DIRECTOR	Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
SECRETARIO	Mtro. Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**COMPARACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LOS LODOS DESHIDRATADOS
GENERADOS CON UN AGENTE INORGÁNICO Y UNO ORGÁNICO EN UNA PLANTA DE
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES**

Tema que me fuera asignado por la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 12 de marzo de 2019.

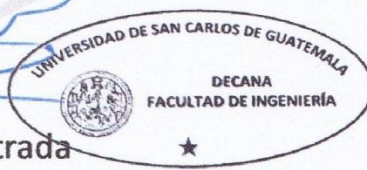
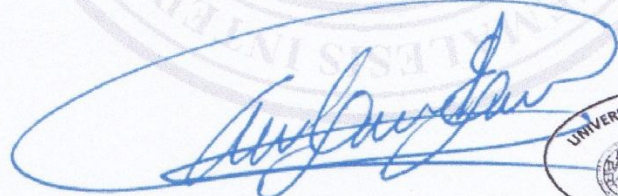


Lic. Ferdiner Ulises González Ortíz

DTG. 283.2021

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **COMPARACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LOS LODOS DESHIDRATADOS GENERADOS CON UN AGENTE INORGÁNICO Y UNO ORGÁNICO EN UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES**, presentado por el licenciado: **Ferdiner Ulises González Ortíz**, estudiante del programa de **Maestría en Energía y Ambiente**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Anabela Cordova Estrada
Decana

Guatemala, julio de 2021.

AACE/cc



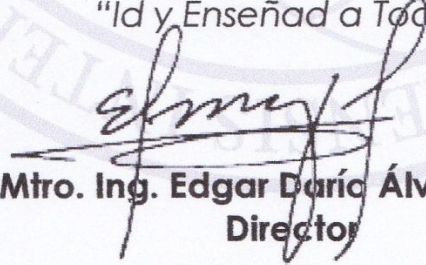
Guatemala, Julio 2021

EEPFI-0778-2021

En mi calidad de Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen y verificar la aprobación del Revisor y la aprobación del Área de Lingüística al Trabajo de Graduación titulado: **"COMPARACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LOS LODOS DESHIDRATADOS GENERADOS CON UN AGENTE INORGÁNICO Y UNO ORGÁNICO EN UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES"** presentado por el Licenciado **Ferdiner Ulises González Ortíz** identifica con carné **200710686** correspondiente al programa de **Maestría en Energía y Ambiente** apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"


Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Coll
Director





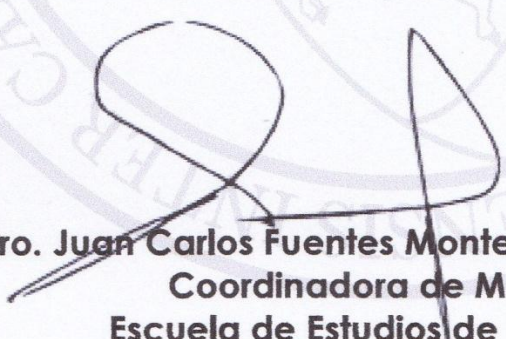
Guatemala, Julio 2021

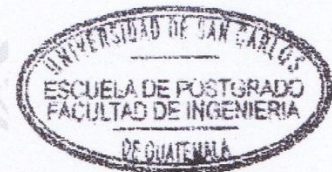
EEPFI-0779-2021

Como Coordinador del programa de Maestría en ENERGÍA Y AMBIENTE doy el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado: **"COMPARACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LOS LODOS DESHIDRATADOS GENERADOS CON UN AGENTE INORGÁNICO Y UNO ORGÁNICO EN UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES"** presentado por el Licenciado **Ferdiner Ulises González Ortíz** quien se identifica con el número de carné **200710686**.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"


Mtro. Juan Carlos Fuentes Montepeque
Coordinadora de Maestría
Escuela de Estudios de Postgrado





Guatemala, Julio 2021

EEPM-0780-2021

En mi calidad como Asesor del Licenciado **Ferdiner Ulises González Ortíz** quien se identifica con número de carné **200710686** procedo a dar el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado: **"COMPARACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LOS LODOS DESHIDRATADOS GENERADOS CON UN AGENTE INORGÁNICO Y UNO ORGÁNICO EN UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES"** quien se encuentra en el programa de **Maestría en Energía y Ambiente** en la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"

Manuel Francisco Cano Alfaro
Máster en Gestión y Auditorías Ambientales
Col. 3175

M. Sc. Manuel Francisco Cano Alfaro

Asesor

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser parte de ella y abrirme las puertas de su seno científico para estudiar este posgrado.
Facultad de Ingeniería	Por todas las atenciones otorgadas, conocimientos, además del privilegio de ser estudiante de tan distinguida institución.
Mis compañeros de la Facultad	Eduardo Motta, Miguel Letrán, Joaquín Duarte, Georges Varadí, Roger Rodríguez, Linda Solís y Débora Calderón, por compartir su sincera amistad, problemas cotidianos y experiencias estudiantiles.
Mi asesor	M. Sc. Manuel Francisco Cano Alfaro, por sus acertados consejos y modificaciones constructivas hacia la fase experimental de este proyecto.
AMSA	Al laboratorio de aguas y sólidos de la autoridad para el manejo sustentable de la cuenca y lago de Amatitlán, por el préstamo de las instalaciones, equipos e insumos para que este proyecto fuera una realidad.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
GLOSARIO	XIII
RESUMEN.....	XIX
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XXIII
OBJETIVOS.....	XXV
RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO	XXVII
INTRODUCCIÓN.....	XXXI
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. Agua residual.....	1
1.1.1. Agua residual domiciliar.....	1
1.1.2. Agua residual urbana.....	2
1.2. Planta de tratamiento de aguas residuales urbanas de tipo ordinario.....	2
1.2.1. Diseño de una planta de tratamiento para aguas residuales de tipo ordinario	3
1.2.1.1. Sistemas de tratamiento de tipo biológico secundario	3
1.3. Generación de lodos en plantas de tratamiento de tipo biológica secundaria.....	4
1.3.1. Sistema de tratamiento primario (generación de lodos primarios)	4
1.3.2. Sistema de tratamiento secundario (generación de lodos secundarios).....	5

1.4.	Cantidad y características de los lodos	6
1.5.	Generación de lodos por medio de agentes coagulantes- floculantes	8
1.5.1.	Fase 1: proceso de coagulación.....	8
1.5.2.	Fase 2: proceso de floculación.....	9
1.6.	Clasificación de agentes coagulantes-floculantes.....	10
1.6.1.	Coagulante-floculante inorgánico (clarificador ClearAqua con aluminio hidrolizado).....	11
1.6.2.	Coagulante-floculante formulado con extractos de origen natural (Ecoclean 2300)	11
1.6.3.	Comparación de agentes coagulantes- floculantes polímero catiónico con aluminio y Ecoclean 2300.....	13
1.7.	Separación de la fase sólida/líquida en la PTAR	17
1.8.	Aprovechamiento de lodos.....	18
1.8.1.	Tratamiento agrícola	19
1.8.2.	Tratamiento energético	19
1.8.3.	Tratamiento en cementeras.....	19
1.8.4.	Tratamiento por vertedero controlado	20
1.9.	Fuentes de energía	20
1.9.1.	Fuentes de energía no convencionales.....	20
1.10.	Uso de lodos generados en PTAR como fuentes no convencionales de energía	21
1.11.	Poder calorífico de lodos.....	21
1.12.	Incineración de lodos como tratamiento final	21
1.12.1.	Combustión de lodos en calderas	22
1.13.	Impacto ambiental.....	22
1.13.1.	Instrumentos ambientales	23

1.13.2.	Impacto ambiental de las plantas de tratamiento de aguas residuales urbanas de tipo ordinario	24
1.13.3.	Impacto ambiental por el uso de polímeros de aluminio en aguas residuales	25
1.13.4.	Impacto ambiental por el uso del agente orgánico Ecoclean 2300	27
1.14.	Diseño técnico de la planta de tratamiento tipo biológica secundaria Santa Isabel II	28
1.15.	Nuevas tecnologías de tratamiento de aguas residuales	30
1.15.1.	Sistema de flotación por aire disuelto	30
1.15.2.	Sistema de decantación lamelar.....	31
2.	CARACTERIZACIÓN DE LODOS GENERADOS CON LOS AGENTES FLOCULANTES, INVENTARIO Y POTENCIAL ENERGÉTICO.....	33
2.1.	Localización geográfica de la planta de tratamiento	33
2.2.	Fase de campo y recolección de muestras	35
2.3.	Caracterización del afluente de la planta de tratamiento de aguas residuales de tipo ordinario Santa Isabel II	36
2.4.	Determinación de pH y sólidos disueltos totales	37
2.5.	Determinación del caudal del afluente de la planta de tratamiento.....	37
2.6.	Ensayos en el laboratorio de aguas y sólidos de AMSA.....	43
2.6.1.	Determinación de demanda química y demanda bioquímica de oxígeno.....	43
2.6.2.	Determinación de la turbiedad.....	44
2.6.3.	Caracterización de sólidos.....	46
2.6.3.1.	Sólidos sedimentables.....	46
2.6.3.2.	Sólidos disueltos totales	47

	2.6.3.3.	Sólidos suspendidos totales	48
	2.6.3.4.	Sólidos totales	49
2.7.		Elaboración de curvas de dosificación para el uso óptimo de floculantes	50
2.8.		Efecto de la dosificación sobre parámetros de interés	54
	2.8.1.	La dosificación y el efecto sobre la turbiedad.....	54
	2.8.2.	La dosificación y el efecto sobre el parámetro color aparente	55
	2.8.3.	La dosificación y el efecto sobre los sólidos suspendidos totales.....	57
2.9.		Obtención de lodos	59
	2.9.1.	Obtención de lodos generados por en funcionamiento de la planta Santa Isabel II.....	59
	2.9.2.	Obtención de lodos con los agentes floculantes secados en horno y al ambiente.....	60
2.10.		Determinación del poder calorífico de los biosólidos y el análisis de sus residuos	64
	2.10.1.	Análisis del poder calorífico de los diferentes sólidos deshidratados.....	64
	2.10.2.	Contenido de los residuos generados por los lodos después de la combustión	66
2.11.		Inventario energético de lodos	68
3.		EFICACIA DEL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE TIPO ORDINARIO CUANDO SE UTILIZA EL AGENTE ECOCLEAN 2300 EN COMPARACIÓN CON EL AGENTE CLEAR AQUA CON ALUMINIO HIDROLIZADO	73
	3.1.	Fase de campo y recolección de las muestras	73
	3.2.	Eficacia del tratamiento con agentes floculantes	74

4.	PROPUESTAS PARA ALTERNATIVAS DE MEJORA EN LOS PROCESOS DE GENERACIÓN DE LODOS Y DE LA CALIDAD DEL AGUA EN EL EFLUENTE DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUALES.....	77
4.1.	Inversión económica de diversas tecnologías de tratamiento para aguas residuales de tipo ordinario	77
4.1.1.	Comparación en inversión económica inicial	77
4.1.2.	Comparación del costo de tratamiento del agua por metro cúbico	78
4.2.	Propuesta de tratamiento y valorización de los lodos y el agua tratada por floculación – coagulación	82
4.3.	Propuesta de obtención y uso de materiales y subproductos	82
4.4.	Propuesta de economía circular para la planta de tratamiento para aguas residuales de tipo ordinario	82
5.	RESULTADOS	85
6.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	103
	CONCLUSIONES	111
	RECOMENDACIONES	113
	REFERENCIAS	115
	APÉNDICES	129

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Diseño sedimentadores tipo cónico con evacuación de sólidos.....	6
2.	Ilustración molecular de la coagulación y la floculación	9
3.	Efecto de la dosificación del coagulante y el pH sobre la turbiedad residual (efecto del sulfato de aluminio)	10
4.	Especies botánicas que componen el agente Ecoclean 2300.....	12
5.	Tanque de sedimentación y filtros percoladores en planta Santa Isabel II, año 2018	18
6.	Localización y área de la planta de tratamiento Santa Isabel II.....	34
7.	Planta de tratamiento de tipo biológica secundaria Santa Isabel II	35
8.	Descripción del caudalímetro y toma de caudal en la planta de tratamiento de tipo biológica secundaria Santa Isabel II	39
9.	Metodología de toma de caudal en la planta de tratamiento	40
10.	Toma de parámetros <i>in situ</i> en la planta de tratamiento de tipo biológica secundaria Santa Isabel II	42
11.	Determinación de la demanda química y demanda bioquímica de oxígeno del afluente de la planta de tratamiento	44
12.	Determinación de la turbiedad del afluente de la planta de tratamiento Santa Isabel II.....	45
13.	Determinación de sólidos sedimentables del afluente y efluentes de la planta de tratamiento Santa Isabel II	47
14.	Determinación de sólidos suspendidos totales del afluente de la planta de tratamiento Santa Isabel II	49
15.	Curva de dosificación con el agente inorgánico Clear Aqua	52

16.	Curva de dosificación con el agente orgánico Ecoclean 2300	53
17.	Elaboración de las curvas de dosificación y su efecto en los sólidos suspendidos, color aparente y turbiedad	58
18.	Patio de secado y lodos para su disposición final de la planta Santa Isabel II	60
19.	Proceso de obtención y secado de lodos.....	63
20.	Proceso de la determinación del poder calorífico de los sólidos	65
21.	Características de los residuos después de la combustión.....	67
22.	Recolección de muestras para la evaluación de la eficacia del tratamiento con agentes floculantes.....	73
23.	Caracterización de la demanda química y demanda bioquímica de oxígeno en el afluente de la planta Santa Isabel.....	87
24.	Caracterización y perfil de sólidos en el afluente de la planta Santa Isabel II	88
25.	Efecto de la dosificación de los floculantes en la turbiedad	89
26.	Efecto de la dosificación de los floculantes sobre el color aparente	90
27.	Efecto de la dosificación de los floculantes sobre los sólidos suspendidos totales	91
28.	Propuesta para tratamiento y valorización de los lodos y el agua procedentes del proceso de floculación	100

TABLAS

I.	Caracterización y sedimentación de partículas en un metro de caída	5
II.	Características y cantidad de lodos	7
III.	Comparación de parámetros entre los floculantes utilizados	15
IV.	Resumen del diseño técnico de la planta Santa Isabel II.....	29
V.	Muestras para caracterización del afluente de la planta Santa Isabel	36

VI.	Fase previa 10 repeticiones para la caracterización del caudal del afluente de la planta de tratamiento Santa Isabel II.....	41
VII.	Curva de dosificación diseñada para el agente Clear Aqua y Ecoclean 2300.....	51
VIII.	Efecto de la dosificación sobre la turbiedad de las muestras obtenidas con los floculantes	54
IX.	Efecto de la dosificación sobre el color aparente de las muestras obtenidas con los floculantes	56
X.	Efecto de la dosificación sobre los sólidos suspendidos totales de las muestras obtenidas con los floculantes	57
XI.	Cálculos necesarios para obtener kg de sólidos por día secados con horno y al ambiente	62
XII.	Determinación del poder calorífico de lodos generados por medio de la planta Santa Isabel II y agentes floculantes	66
XIII.	Contenido de los residuos generados por los lodos después de la combustión en base húmeda	67
XIV.	Estimación de la energía de lodos por medio del funcionamiento de la planta de tratamiento	68
XV.	Estimación de la energía de lodos generados por medio del agente Clear Aqua secados en horno	69
XVI.	Estimación de la energía de lodos generados por medio del agente Ecoclean 2300 secados en horno	70
XVII.	Estimación de la energía de lodos generados por medio del agente Clear Aqua secados al ambiente.....	71
XVIII.	Estimación de la energía de lodos generados por medio del agente Ecoclean 2300 secados al ambiente.....	72
XIX.	Ejemplo de la evaluación de parámetros al utilizar agentes floculantes en comparación con el funcionamiento de la planta.....	75

XX.	Ejemplo de la eficacia del tratamiento cuando se utilizan agentes floculantes en comparación con el funcionamiento de la planta	75
XXI.	Costo de floculantes por metro cúbico de agua tratada con tecnología de la planta de tratamiento Santa Isabel II	80
XXII.	Costo de floculantes por metro cúbico de agua tratada con tecnología de flotación por aire disuelto FAD.....	81
XXIII.	Ingresos anuales por venta de sólidos deshidratados al ambiente	83
XXIV.	Ingresos anuales por venta de aguacates al utilizar el agua tratada de los sistemas	84
XXV.	Estimación del caudal en el afluente de la planta de tratamiento Santa Isabel II	85
XXVI.	Caracterización del pH del Ecoclean 2300, polímero con aluminio y el afluente de la planta Santa Isabel II	86
XXVII.	Comparaciones de poder calorífico de lodos obtenidos a nivel de laboratorio con lodos de depuradoras producidos industrialmente	92
XXVIII.	Elaboración del inventario energético de lodos generados en la PTAR en comparación de los obtenidos por agentes floculantes por año.....	94
XXIX.	Evaluación de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos en aguas residuales al utilizar agentes floculantes en comparación con el funcionamiento de la planta.....	96
XXX.	Porcentaje de eficacia del tratamiento de aguas residuales de tipo ordinario cuando se utilizan agentes floculantes.....	97
XXXI.	Proyección de inversión económica inicial de diversas tecnologías de tratamiento de aguas residuales de tipo ordinario.....	98
XXXII.	Comparación del precio del agua tratada por metro cúbico por medio de diferentes tecnologías	99
XXXIII.	Propuesta de economía circular de la planta de tratamiento al comercializar materiales y subproductos	102

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
Q	Caudal
GJ	Giga Julio
°C	Grados Celsius
g	Gramo
ha	Hectárea
h	Hora
HR	Humedad relativa
J	Julio
kg	Kilogramo
kW	Kilovatio
®	Marca registrada
MJ	Mega Julio
m²	Metro cuadrado
m³	Metro cúbico
µg/L	Microgramo/litro
µL	Microlitro
mg	Miligramo
mg/L	Miligramo/litro
mL	Mililitro
min	Minuto
L	Litro
O₂	Oxígeno
%	Porcentaje

Q	Quetzal
S	Segundo
U	Unidad
pH	Unidades de pH

GLOSARIO

Afluente	Agua captada por un ente generador.
Agua residual	Aguas que han sido utilizadas y cuyas cualidades han sido modificadas.
Biosólido	Productos sólidos orgánicos procedentes del tratamiento de aguas residuales los cuales pueden ser utilizados de manera beneficiosa.
Calor	Energía cinética total de todos los átomos o moléculas de una sustancia.
Caudal	Volumen de agua por unidad de tiempo.
Capacidad calorífica	Cantidad de calor que se requiere para elevar la temperatura de una sustancia en una unidad de temperatura (cambios de temperatura bajo un suministro de calor controlado).
Combustible	Sustancia o material que al combinarse con oxígeno es capaz de reaccionar emitiendo calor.
Cuerpo receptor	Embalse natural, lago, laguna, río, quebrada, manantial, humedal y agua subterránea donde se descargan aguas residuales.

DBO	Demanda bioquímica de oxígeno. Determinación de los requerimientos de oxígeno para la degradación bioquímica de la materia orgánica en las aguas municipales, industriales y en general residuales.
DQO	Demanda química de oxígeno. Determina la cantidad de oxígeno requerido para oxidar la materia orgánica en una muestra de agua residual, bajo condiciones específicas de agente oxidante, temperatura y tiempo.
Efluente	Aguas residuales descargadas por un ente generador.
Ente generador	Persona individual o jurídica, pública o privada, responsable de generar o administrar aguas residuales de tipo especial, residual o mezcla de ambas, cuyo efluente final se descarga a un cuerpo receptor.
Haber Bosch	Reacción de nitrógeno e hidrógeno gaseoso para producir amoníaco (fijación de nitrógeno).
LMP	Límite máximo permisible. Medida de la concentración o grado de elementos o sustancias (físicos, químicos y biológicos), que caracterizan a un efluente, que al ser excedida causa o puede causar daños a la salud, al bienestar humano y al ambiente.

MDL	Mecanismo de desarrollo limpio. Incentivo de proyectos de inversión que ayuda a concretar proyectos que contribuyen al desarrollo sostenible del país y a la vez reducen las emisiones de GEI.
Muestra	Parte representativa de un agua residual susceptible de ser analizada para ser reusada como agua o lodo.
NTU	<i>Nephelometric turbidity unit</i> por sus siglas en inglés. Es la unidad que mide el instrumento (nefelómetro o turbidímetro) que mide la intensidad de la luz dispersada a 90° cuando un rayo de luz pasa a través de una muestra de agua.
Parámetro	Variable que identifica una característica de las aguas residuales, aguas para reúso o lodos, asignándole un valor numérico.
Partes por billón	Por su abreviatura (ppb), se refiere a microgramos de analito por litro de agua.
Partes por millón	Por su abreviatura (ppm), se refiere a miligramos de analito por litro de agua.

PTAR	Planta de tratamiento de aguas residuales. Conjunto de operaciones y procesos unitarios de origen fisicoquímico, biológico, o combinación de ellos que están envueltos por fenómenos de transporte y manejo de fluidos.
PCI	Poder calorífico inferior. Energía liberada al quemar completamente en oxígeno 1 kg de combustible, estando inicialmente ambos reactivos a 25 °C y quedando los productos estables a máxima oxidación a 25 °C y el agua obtenida en estado gaseoso.
PCS	Poder calorífico superior. Energía producida cuando todos los elementos de la combustión (combustible y aire) se toman a 0 °C y los productos de la combustión se llevan también a 0 °C después de la combustión, por lo que el vapor de agua está condensado.
SFAD	Sistema de flotación por aire disuelto. Sistema que se basa en un proceso fisicoquímico que separa las partículas sólidas de la matriz líquida mediante adición de burbujas muy finas a una presión determinada.
SS	Sólidos sedimentables. Cantidad de material que sedimenta (orgánica e inorgánica) de una muestra en un período determinado.

SST	Sólidos suspendidos totales. Porción de sólidos retenidos por un filtro de fibra de vidrio que posteriormente se seca a 103 – 105 °C hasta peso constante.
ST	Sólidos totales. Materia que permanece como residuo después de la evaporación y secado a 103 - 105 °C (incluye a solidos disueltos y no disueltos).
STD	Sólidos totales disueltos. Medida del contenido combinado de todas las sustancias inorgánicas y orgánicas contenidas en un líquido en forma molecular, ionizada o en forma de suspensión coloidal.
Unidades Pt/Co	Unidades de platino y cobalto. Es una escala estandarizada para la determinación de color en muestras de agua, específicamente para detectar tonos amarillos típicos de las aguas residuales de tipo ordinario y agua que contiene materia orgánica.

RESUMEN

El tratamiento de tipo biológico secundario aplicado a aguas residuales genera biosólidos, los cuales no poseen un manejo adecuado, ya que por su origen y composición representan un problema ambiental y de salud. El objetivo general de esta investigación fue la comparación de la eficiencia energética de lodos generados con dos agentes floculantes (orgánico Ecoclean 2300 e inorgánico Clear Aqua), en una planta de tratamiento de aguas residuales para ser propuestos como fuentes no convencionales para la producción de energía.

Se realizaron ensayos a nivel de laboratorio con muestras de agua del afluente procedentes de la planta de tratamiento Santa Isabel II. Los lodos generados por la tecnología de la planta de tratamiento y los ensayos realizados con los agentes floculantes (deshidratados en horno y al ambiente), se proyectaron como potencia que puede ser aportada a un sistema de cogeneración de energía.

Los lodos generados únicamente por la tecnología de la planta de tratamiento se estimaron en 67 toneladas y aportaron una potencia de 57 kW y una estimación anual de energía de 249 660 kWh. Los biosólidos deshidratados al ambiente obtenidos con el agente Ecoclean 2300 (232 toneladas), aportaron una potencia de 216 kW y una estimación anual de energía de 946 080 kWh.

Con el agente Clear Aqua (249 toneladas), se documentó una potencia de 204 kW y una proyección anual de energía de 893 520 kWh. Lo anterior registró un aumento de la eficiencia energética en 379 % y 358 % cuando se utilizó el agente Clear Aqua y el agente Ecoclean 2300, respectivamente.

Los biosólidos deshidratados en horno obtenidos con el agente Ecoclean 2300 (159.5 toneladas), aportaron una potencia de 153 kW y una valorización anual de energía de 670 140 kWh. Con el agente Clear Aqua (198.5 toneladas), se documentó una potencia de 209 kW y una contribución anual de energía de 916 420 kWh. Con base en lo anterior, se describió un aumento de la eficiencia energética en 267 % y 366 % cuando se utilizó el agente Clear Aqua y el agente Ecoclean 2300 secados en horno, respectivamente.

Ambientalmente el agua tratada con ambos floculantes cumplió con el Acuerdo Gubernativo número 236-2006, en el artículo 34, en los parámetros de agua para riego agrícola en general y reúso para acuicultura. Respecto de la eficacia del tratamiento los parámetros de mayor relevancia fueron, la remoción de fósforo total (98 % de eficacia de remoción con el agente Clear Aqua y 90 % con el agente Ecoclean 2300), la demanda bioquímica de oxígeno (79 % de eficacia de remoción con el agente Clear Aqua y 75 % con el agente Ecoclean 2300) y los sólidos suspendidos totales (95 % de eficacia de remoción con el agente Clear Aqua y 89 % con el agente Ecoclean 2300), que fueron clave para proponer un efluente con mejor calidad.

El costo por metro cúbico de agua tratada se proyectó en Q. 5.68 (Clear Aqua) y Q. 8.32 (Ecoclean 2300), este precio incluye remoción de nutrientes de importancia biológica como fósforo disuelto y que puede ser incluido también como un sistema de tratamiento terciario. Comparado con el costo por metro cúbico de la planta de tratamiento Santa Isabel II (Q. 1.12), es más económico, no obstante, los sistemas de tratamiento de tipo biológico secundario no reducen nutrientes.

Se propuso un sistema de tratamiento de agua con tecnología alternativa de mejora que se estimó en Q. 1 623 000 y donde se estimaron ingresos económicos por más de un millón de quetzales. Este ingreso se basó en la venta de biosólidos obtenidos con dichos agentes floculantes y secados al ambiente, así como la venta de frutos de aguacatales colocados en una hectárea como cultivo muy intensivo (2.5 m x 2.5 m), para establecer una barrera biológica que puede utilizar los nutrientes del efluente del sistema de tratamiento (sistema de tratamiento terciario) y al mismo tiempo se puede crear una zona de recarga hídrica natural que puede funcionar todo el año.

Con base en lo anterior, se concluyó que el uso de agentes floculantes aumentó la obtención de lodos y su eficiencia energética, lo que permitió proyectar un inventario energético anual. Al mismo tiempo se documentó que estos agentes incrementan la remoción de parámetros fisicoquímicos de calidad del agua utilizados como indicadores en el Acuerdo Gubernativo número 236-2006. Esta investigación fue de importancia, ya que, de un material potencialmente peligroso para el ambiente y la salud humana, se diseñó un mejoramiento de la calidad del agua respecto del funcionamiento de la planta de tratamiento Santa Isabel II.

Se recomienda realizar una descripción cualitativa del lodo utilizado como biomasa para obtención de energía como muestra para análisis de granulometría a fin de profundizar en el estudio y sedimentación del lodo primario. Evaluar los agentes floculantes como una acción correctiva a un sistema de tratamiento el cual consiste en un dosificador de floculantes entre los filtros percoladores y el clarificador para remover los sólidos suspendidos y establecer un tratamiento terciario para remover nutrientes. Se deberá diseñar un sistema de registro, mantenimiento, control y seguimiento de la generación de lodos deshidratados a fin asegurar el abastecimiento del biocombustible.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las plantas de tratamiento que generan lodos tienen espacios asignados para el secado con objeto de reducir la humedad, facilitar su manipulación y con ello disminuir los costes de transporte hacia vertederos. Estos terrenos suelen carecer de medidas correctivas para amortiguar el impacto ambiental y no disponen de red de drenaje para la colecta de lixiviados, con lo que, en épocas de lluvias produce un impacto sobre el ambiente y la salud pública. Además, suelen carecer de medios que permitan controlar el proceso de secado, determinar el grado de estabilidad y de higienización alcanzado por el lodo.

Para Guatemala, en algunas zonas urbanas aledañas a las plantas de tratamiento estos lodos son utilizados como abono orgánico sin tratamiento previo, sin embargo no cumplen con los límites máximos permisibles en microbiología según el Acuerdo Gubernativo número 236-2006, Reglamento de las descargas y reusó de aguas residuales y de la disposición de lodos, ya que la concentración de Unidades Formadoras de Colonias (UFC) está presente en un rango de riesgo para la salud humana en los lodos después de estar expuesto 45 días a radiación solar, según el estudio de Flores Barrios (2009).

Si los lodos no son adecuados para uso agrícola según el Acuerdo Gubernativo número 236-2006, se debe destinar a un vertedero. Si estos no son tratados adecuadamente, este procedimiento da lugar a reservorio de plagas y a la emisión de sustancias volátiles características que provocan rechazo social.

El uso indiscriminado de las prácticas antes mencionadas puede llevar a la alteración de las características del suelo receptor y a la contaminación de las aguas subterráneas, de cultivos y de la cadena trófica. Según lo anterior, si no se pueden utilizar para uso agrícola y no existe un vertedero común adecuado, surge la pregunta central de la investigación:

- ¿Cómo se pueden comparar de forma energética los lodos si pueden ser generados con un agente inorgánico y uno orgánico en una planta de tratamiento de aguas residuales para ser propuestos como fuentes no convencionales para la producción de energía?
- Con base en la pregunta anterior, ¿Cómo se puede calcular la cantidad de lodos generados y la energía que estos pueden proveer cuando son obtenidos con un agente inorgánico en comparación con uno orgánico en una planta de tratamiento de aguas residuales de tipo ordinario?
- Sin embargo, existen varios indicadores para medir la eficacia de la remoción de los sólidos, entonces ¿Con que indicadores se puede evaluar la eficacia del tratamiento de aguas residuales de tipo ordinario cuando se utiliza un agente inorgánico en comparación con uno orgánico para que puedan contribuir a la generación de sólidos y clarificación del agua?
- Para realizar lo anterior se debe tener en cuenta aspectos económicos, por lo tanto ¿cuál es la viabilidad financiera de alternativas de mejoras en los procesos de obtención de lodos para la generación de fuentes de energía no convencionales y la mejora de la calidad del agua en el efluente de una planta de tratamiento de aguas residuales de tipo ordinario?

OBJETIVOS

General

Comparar la eficiencia energética de lodos generados con un agente inorgánico y uno orgánico en una planta de tratamiento de aguas residuales para ser propuestos como fuentes no convencionales para la producción de energía.

Específicos

- Estimar la cantidad de lodos generados y el potencial energético que pueden proveer cuando son obtenidos con un agente inorgánico en comparación con uno orgánico en una planta de tratamiento de aguas residuales de tipo ordinario.
- Evaluar la eficacia del tratamiento de aguas residuales de tipo ordinario cuando se utiliza un agente inorgánico en comparación con uno orgánico, a través de análisis comparativo de parámetros fisicoquímicos de calidad del agua.
- Determinar la viabilidad financiera de alternativas de mejora en los procesos de generación de lodos y de la calidad del agua en el efluente de plantas de tratamiento de aguas residuales de tipo ordinario.

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

La investigación se realizó por medio de un estudio no experimental de tipo cuantitativo descriptivo. Sin embargo, fueron necesarios ensayos a nivel de laboratorio a partir de la comparación entre el agente floculante inorgánico Clear Aqua y el agente orgánico Ecoclean 2300, para evaluar y proyectar los beneficios desde el punto de vista energético, ambiental y económico.

Actualmente, en el país se han promovido proyectos para trabajar con lodos o biosólidos procedentes de las plantas de tratamiento de tipo ordinario, sin embargo, todos han sido enfocados a producción agroindustrial, recuperación de suelo, compostaje o en reactores anaeróbicos de flujo ascendente (RAFA), para que la energía generada pueda autoalimentar la planta de tratamiento o se pueda incorporar al sistema energético del país.

Sin embargo, se ha documentado que los lodos incorporados al suelo pueden ser potencialmente peligrosos si no se les otorga el tratamiento previo adecuado y los lodos para generar metano no son los suficientes en relación a volumen para cubrir los gastos iniciales de la implementación de los sistemas.

Con base en lo anterior, se seleccionó uno de varios diseños de plantas de tratamiento, la planta de tratamiento de aguas residuales de tipo ordinario Santa Isabel II, ubicada en el municipio de Villa Nueva, departamento de Guatemala, ya que su funcionamiento es de tipo biológico secundario y genera lodos como subproductos del tratamiento de agua.

Como fase previa, se caracterizó el afluente de la planta de tratamiento Santa Isabel II para determinar los parámetros que influyeron en la generación, formación y secado de lodos. Los parámetros evaluados fueron: pH, caudal del afluente, demanda química y bioquímica de oxígeno, turbiedad y perfil de sólidos (sólidos sedimentables, sólidos suspendidos totales, sólidos disueltos totales y sólidos totales). Los anteriores parámetros se documentaron por medio de 10 repeticiones de toma de muestras del afluente y se representaron por medio del gráfico de caja.

Como fase previa a la evaluación de las eficiencias, se realizó la prueba de las jarras o curva de dosificación, para cada uno de los agentes floculantes, agente inorgánico Clear Aqua y agente orgánico Ecoclean 2300. En dicha prueba se utilizaron variaciones en la dosis del agente floculante (100 a 800 μL incrementándose cada 100 μL del agente por litro de muestra). Entre las curvas se realizó el siguiente procedimiento: se utilizó la misma muestra, las mismas concentraciones de agentes floculantes, el mismo tiempo de acción (7 minutos) y no se modificó el pH de la muestra. Ambas curvas se representaron por medio de gráficos de líneas con marcadores y los parámetros evaluados fueron: pH, turbiedad, color aparente y sólidos suspendidos totales.

El secado de los lodos se realizó por medio de dos propuestas: 1) secado térmico en horno: 100 mL de lodos se secaron en un crisol de porcelana por medio de una plancha a 80 °C por 12 horas y el sólido deshidratado se colocó en un horno a 105 °C por una hora. 2) secado térmico solar: 100 mL de lodos se secaron en un crisol de porcelana en condiciones ambientales (40°C sensación térmica cuando un termómetro calibrado fue expuesto al sol y 50 % de humedad), por 7 días. Con los lodos obtenidos de los tratamientos térmicos se procedió a determinar el poder calorífico inferior y superior.

También se realizó la proyección de sólidos/año que la planta de tratamiento puede generar por medio de su funcionamiento a través de la colecta de los sólidos sedimentables y su posterior proceso de digestión anaeróbica. Para la determinación del poder calorífico inferior de los sólidos provenientes de lodos digeridos, se recolectó una muestra del patio de secado de lodos. Con los datos obtenidos de la fase de secado se procedió a realizar el inventario energético por medio de la proyección de sólidos deshidratados/año y multiplicado por la capacidad calorífica respectiva, se establecieron cinco opciones de biosólidos disponibles y la energía que pueden generar por año.

Respecto de la eficacia del tratamiento de aguas residuales de tipo ordinario cuando se utiliza el agente Clear Aqua comparado con el agente Ecoclean 2300 para generar lodos, se obtuvo una fase sólida/líquida, en la cual la fase líquida (después de generada de la acción de aplicar los floculantes), se sometió a un análisis comparativo de parámetros fisicoquímicos de calidad del agua para evaluar su cumplimiento según normativas ambientales locales. El agua tratada se comparó con los límites que establece el Acuerdo Gubernativo número 236-2006, Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos.

En el aspecto económico se realizaron proyecciones de la inversión económica inicial que significaría el colocar una planta de tratamiento en la actualidad, con las siguientes características: 1. Una planta de tratamiento construida en sitio. 2. Una planta de tratamiento con módulos prefabricados. 3. Una planta de tratamiento con la tecnología de la Planta Santa Isabel II. 4. Un sistema de tratamiento móvil. El sistema de tratamiento de flotación por aire disuelto (SFAD) con sistema de secado de lodos y producción de aguacate Hass por medio de cultivo muy intensivo.

Con base en lo anterior, se procedió a describir el precio del agua tratada por metro cúbico según las siguientes tecnologías: 1. Planta de tratamiento Santa Isabel II. 2. Planta de tratamiento Santa Isabel II con el agente Clear Aqua. 3. Planta de tratamiento Santa Isabel II con el agente Ecoclean 2300. 4. Sistema de flotación por aire disuelto con el agente Clear Aqua. 5. Sistema de flotación por aire disuelto con el agente Ecoclean 2300.

También se propuso un esquema gráfico de tratamiento y valorización de lodos y agua procedentes del proceso de floculación según las tecnologías y procesos que se puedan utilizar localmente. Con base en lo anterior se detalló una propuesta de economía circular a la planta de tratamiento donde se proyectaron ingresos económicos por la venta de subproductos del tratamiento del agua como la venta de los biosólidos según su capacidad calorífica y la venta de los frutos, aguacate Hass, colocados como sistemas biológicos asimiladores de nutrientes.

INTRODUCCIÓN

El aumento de la población en Guatemala y específicamente en los municipios del departamento de Guatemala, como Villa Nueva, ha hecho que se incremente la red de distribución de agua potable y drenaje. Lo anterior también ha dado como consecuencia la construcción de plantas de tratamiento, lo que ha implicado mayor tratamiento de agua residual y como subproducto del agua tratada se producen lodos o biosólidos.

Con base en lo anterior, se han creado estrategias donde pueden aprovecharse o poseer una disposición final adecuada. Una de las actividades es la gestión energética. Sin embargo, a nivel local no se ha registrado el uso de estos lodos deshidratados para industrias que trabajen con sistemas de recuperación de energía eléctrica, mecánica y calorífica (incineración).

Para estudiar con detalle este potencial, en la presente investigación se propuso la caracterización energética de los sólidos deshidratados obtenidos de una planta de tratamiento de tipo biológico secundario en comparación con los sólidos deshidratados obtenidos con agentes floculantes.

Así mismo, la evaluación del agua tratada con agentes floculantes se realizó para indicar si cumple con los parámetros establecidos con las normativas ambientales locales. Se propusieron alternativas de mejora con un análisis de viabilidad financiera basado en implementación de diferentes tecnologías, costo unitario del tratamiento del agua y costo por la venta de materiales y subproductos procedentes del tratamiento del agua.

Es estimado que el proyecto puede generar hasta 249 toneladas de biosólidos/año secados al ambiente cuando el agua es tratada con el agente Clear Aqua, con una potencia aportada de 204 kW. Se documentó que se pueden obtener hasta 232 toneladas de biosólidos/año secados al ambiente cuando el agua es tratada con el agente Ecoclean 2300 y una potencia aportada de 216 kW. En la eficacia del tratamiento de agua, removi6 de forma eficaz m6s del 85 % de par6metros fisicoqu6micos de relevancia como turbiedad, color aparente, s6lidos suspendidos totales, ortofosfatos y f6sforo total.

En las alternativas de mejora se promovieron tecnolog6as como el sistema de flotaci6n por aire disuelto (SFAD) combinado con agentes floculantes. Se estim6 que este sistema puede generar un ingreso anual de hasta Q. 1 032 000 con agente Clear Aqua y Q. 1 049 000 con el agente Ecoclean 2300, por la venta de s6lidos y la venta de frutales, aguacate Hass, utilizados como sistemas naturales de absorci6n de nutrientes procedentes del agua tratada.

Para lograr lo anterior, en el cap6tulo 1 se realiz6 una exploraci6n bibliogr6fica basada en principios te6ricos y datos experimentales sobre el agua residual, las plantas de tratamiento, agentes coagulantes y floculantes, su principio y clasificaci6n, las caracter6sticas de la biomasa generada a partir de lodos, su aprovechamiento, impactos ambientales y legislaci6n guatemalteca, as6 como indicadores ambientales.

En el cap6tulo 2 se realiz6 la caracterizaci6n de lodos generados, inventario y su potencial energ6tico cuando se obtienen a trav6s del establecimiento de dosis 6ptimas del agente Ecoclean 2300 comparado con el agente Clear Aqua.

En el capítulo 3 se documentó la eficacia del tratamiento de aguas residuales de tipo ordinario cuando se utiliza el agente Ecoclean 2300 en comparación con el agente Clear Aqua, al compararlo con el Acuerdo Gubernativo número 236-2006 Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos.

En el capítulo 4 se detalló la viabilidad financiera de alternativas de mejoras en los procesos de obtención de lodos y mejora de la calidad del agua basado en infraestructura de los sistemas de tratamiento y sus tecnologías, costo del tratamiento unitario del agua y establecimiento de una economía circular por la venta de materiales y subproductos procedentes del tratamiento del agua. En el capítulo 5 se presentaron los resultados y en el capítulo 6 se discutieron los mismos.

Por último, se presentaron las conclusiones que dejan en evidencia el aporte del proyecto por medio del uso de la planta de tratamiento Santa Isabel II para la comparar eficacia de remoción de sólidos y clarificación del agua de dos agentes floculantes. Así mismo, se hacen otras proyecciones y propuestas necesarias en materia de gestión, el ámbito energético, ambiental y bienestar social tomando como base esta investigación.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Agua residual

El Acuerdo Gubernativo número 236-2006, Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos, establece un agua residual como “las aguas que han recibido uso y cuyas calidades han sido modificadas” (p. 8).

1.1.1. Agua residual domiciliar

El Acuerdo Gubernativo número 236-2006, Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos, establece un agua residual de tipo ordinario como “aguas residuales generadas por las actividades domésticas, tales como usos en servicios sanitarios, pilas, lavamanos, lavatrastos, lavado de ropa y otras similares, así como mezcla de las mismas que se conduzcan a través de un alcantarillado” (p. 8).

Cabe destacar que el producto final del agua residual domiciliar en relación con su composición es uniforme, como lo es en gran cantidad de materia orgánica biodegradable, altas concentraciones de poblaciones bacterianas, nutrientes como fósforo y nitrógeno. Así mismo, el agua residual domiciliar varía muy poco respecto al nivel socioeconómico y cultural entre las poblaciones (Villegas Gallón y Vidal Tordecilla, 2009).

1.1.2. Agua residual urbana

Descargas se generan en concentraciones de poblaciones urbanas como consecuencia de las actividades diarias. Sin embargo, aunque los aportes de una urbe sean homogéneos, porque serán siempre los mismos, y se documente su composición, las características de cada descarga dependerán del tipo de poblaciones urbanas influyendo indicadores como habitantes, industrias y tipo de servicios prestados a la sociedad (Vásquez Orozco, 2009).

1.2. Planta de tratamiento de aguas residuales urbanas de tipo ordinario

"El tratamiento de las aguas residuales domésticas tiene como objetivo eliminar los contaminantes del agua, producir agua potable limpia y generar residuos sólidos aptos para reutilizarse o liberarse al medio ambiente" (*Masters Builders Solutions*, 2017, p. 6).

Como se mencionó anteriormente, las aguas deben de ser depuradas hasta alcanzar un grado de clarificación que permita su unión a un cuerpo de agua receptor (como un río) o garantizar su reutilización sin riesgos para la salud humana, animal y el ambiente (Avalos Ochoa, 2009). Sin embargo, para garantizar que el agua se puede utilizar en diversas actividades de la agroindustria se debe de cumplir con la normativa legal vigente en Guatemala, el Acuerdo Gubernativo 236-2006, Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos (Ramírez Bach, 2010).

1.2.1. Diseño de una planta de tratamiento para aguas residuales de tipo ordinario

Dentro de las plantas de tratamiento que tiene a su cargo la Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y del Lago de Amatitlán (AMSA), se encuentran clasificadas según el tipo de tratamiento como: oxidorreducción, reactor anaeróbico de flujo ascendente, lagunas de oxidación, lagunas de estabilización y biológica secundaria. (AMSA, 2001, p. 7)

1.2.1.1. Sistemas de tratamiento de tipo biológico secundario

El pretratamiento y el tratamiento primario incluyen el cribado (que elimina los residuos de grandes dimensiones), la aplicación de chorro de arena (que elimina la arena), el desengrasado (que elimina las sustancias grasas) y la decantación primaria. En este paso se eliminan los elementos más bastos. (*Masters Builders Solutions*, 2017, p. 9)

En el tratamiento secundario, por lo general, se usa la vía biológica, en donde las partículas coloidales, sólidos suspendidos y materia orgánica disuelta que no sedimentaron en el pretratamiento y tratamiento primario, sean asimiladas por bacterias. También puede incluir oxigenación para reducir las grasas remanentes y promover la sedimentación secundaria (*Masters Builders Solutions*, 2017). Además, contiene un tratamiento de fangos que se realiza al mismo tiempo que el tratamiento de aguas y posteriormente un patio de secado de lodos para reducir su volumen y disponer de ellos adecuadamente según normativas locales vigentes (*Masters Builders Solutions*, 2017).

1.3. Generación de lodos en plantas de tratamiento de tipo biológica secundaria

“Un lodo, es un sólido con contenido variable de humedad proveniente del tratamiento de aguas residuales” (Acuerdo Gubernativo número 236-2006, Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos, p. 9).

1.3.1. Sistema de tratamiento primario (generación de lodos primarios)

Según AMSA (2001):

En el caso de una planta de tratamiento biológica secundaria, como la planta Santa Isabel II, el objetivo del tratamiento primario es la degradación de la materia orgánica, sin reducir la población de agentes patógenos. En esta fase únicamente se realiza la separación de la fase sólida/líquida por medio de principios físicos, con la finalidad de eliminar la mayor cantidad de materia orgánica que consume oxígeno, sólidos sedimentables. (p. 242)

Es importante caracterizar los sólidos del afluente, para dimensionar la obra adecuada, así como el tiempo de retención para retirar los sólidos, como se observa en la tabla 1. Lo anterior según Limón Macías (2013) y Torrellas Hidalgo (2013), se logra comúnmente con el diseño de un tanque sedimentador (figura 1) o con agentes químicos como sulfato de aluminio, sales de hierro o agentes orgánicos a partir de extractos botánicos, Ecoclean 2300, que producen más concentración de lodo en menos tiempo, producto de un mayor secuestro en una precipitación química de la materia floculada.

1.3.2. Sistema de tratamiento secundario (generación de lodos secundarios)

Los lodos de tipo secundario son el resultado de procesos biológicos que convierten los residuos presentes en el agua en biomasa alternativa. Esta biomasa también incluye el material particulado que no sedimentó en el tratamiento primario y se unifica con la biomasa. El volumen de este sólido depende de varios factores como: eficiencia del tratamiento primario, cantidad de sólidos suspendidos totales (SST), demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), remoción de nutrientes y diseño efectivo de los sedimentadores (Limón Macías, 2013). En la tabla II se muestra la caracterización de los lodos secundarios.

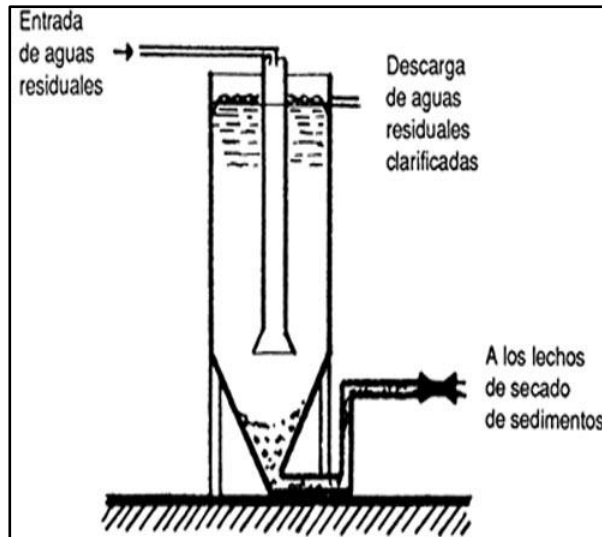
La planta de tratamiento Santa Isabel II posee sedimentadores primarios y secundarios de forma cónica con un diámetro exterior de 13.30 metros (m) y un canal de recolección del efluente dentro del sedimentador que es de 0.50 m de ancho, además posee una tubería de prolongación para la evacuación de lodos y cuenta con rampa central. (AMSA, 2001, p. 242)

Tabla I. **Caracterización y sedimentación de partículas en un metro de caída**

Tipo	Diámetro (m)	Área de superficie (m ²)	Tiempo de sedimentación
Grava	0.01	3.14×10^{-4}	1 segundo
Arena gruesa	1×10^{-3}	3.14×10^{-3}	10 segundos
Arena fina	1×10^{-4}	3.14×10^{-2}	125 segundos
Limo	1×10^{-5}	0.314	108 minutos
Bacterias	1×10^{-6}	3.14	180 hora
Material coloidal	1×10^{-7}	31.4	755 días

Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de Kemmer y McCallion (2001). *Manual del agua. Su naturaleza, tratamiento y aplicaciones.*

Figura 1. **Diseño sedimentadores tipo cónico con evacuación de sólidos**



Fuente: Kemmer y McCallion (2001). *Manual del agua. Su naturaleza, tratamiento y aplicaciones.*

1.4. Cantidad y características de los lodos

Según Metcalf y Eddy, Inc., Tchobanoglous, Burton y Stensel (2003), las propiedades fisicoquímicas de los lodos dependen del origen, el tiempo de retención en los sistemas de tratamiento y el tipo de tratamiento posterior a su obtención. Así, por ejemplo, un lodo primario presenta mayores partículas para sedimentación que uno secundario, por lo tanto, tendrá una mayor concentración de sólidos, como se indica en la tabla II.

También es relevante el aporte de Limón Macías (2013), indicando que “el volumen del lodo depende en su mayoría del contenido de humedad, con un valor típico del 94 %. En cambio, un lodo secundario tiene el 98.5 al 99.5 % de humedad” (p. 13).

Tabla II. **Características y cantidad de lodos**

Parámetros	Lodos primarios	Lodos secundarios	Lodos digeridos
pH	5.50 – 6.50	6.50 – 7.50	6.80 – 7.00
Agua (%)	92 - 96	97.50 - 99	94 - 97
Sólidos suspendidos volátiles (%)	70 - 80	80 - 90	55 - 65
Grasas (%)	12 - 14	3 - 5	4 - 12
Proteínas (%)	4 - 14	20 - 30	10 - 20
Carbohidratos (%)	8 - 10	6 - 8	5 - 8
Nitrógeno (%)	2 - 5	1 - 6	3 - 7
Fósforo (%)	0.50 – 1.50	1.50 – 2.50	0.50 – 1.50
Bacterias patógenas (número más probable /100 mL)	10 ³ -10 ⁵	10 – 1 000	10 - 100
Metales pesados (Zinc, Cobre, Plomo) (%)	0.20 - 2	0.20 - 2	0.20- 2
Celulosa (%)	8 - 15	---	8 - 15
Ácidos orgánicos mg/L	200 – 2 000	1 100 – 1 700	100 - 600
óxido de silicio (% sólidos totales)	15 – 20	---	10 - 20
Alcalinidad (mg CaCO ₃ /L)	500 – 1 500	580 – 1 100	2 500 – 3 500
Contenido energético en MJ (sólidos totales/kg)	23 - 29	19 - 23	9 - 14

Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de Hernández (1992). *Depuración de aguas residuales. Servicio de publicaciones de la Escuela de Ingenieros de Caminos de Madrid* y Metcalf y Eddy, Inc., Tchobanoglous, Burton y Stensel (2003). *Wastewater Engineering Treatment and Reuse*.

1.5. Generación de lodos por medio de agentes coagulantes-floculantes

Según Limón Macías (2013), tanto en el tratamiento primario como en el secundario se pueden utilizar agentes de origen orgánico, extractos botánicos o agentes inorgánicos como sales de aluminio o hierro, para realizar una precipitación química (coagulación-floculación) que hace más rápida y eficaz la sedimentación y posterior generación de lodos.

Estos procesos se pueden realizar en conjunto con el diseño técnico de la planta de tratamiento o bien con el diseño de plantas de tratamiento que se acoplen al tiempo de acción y eficiencia de los coagulantes-floculantes (*Masters Builders Solutions*, 2017 y *Eco Health Products Private Limited*, 2018).

1.5.1. Fase 1: proceso de coagulación

Tomando como ejemplo la clarificación del agua superficial, el agua cruda contiene material suspendido, tanto sólidos bastante grandes que se asientan en reposo y sólidos dispersados que no se asientan con facilidad. Una parte de estos sólidos que no se asientan pueden ser coloides. Cada partícula se encuentra estabilizada por cargas eléctricas negativas sobre su superficie, haciendo que repela las partículas vecinas, como se repelen mutuamente dos polos magnéticos.

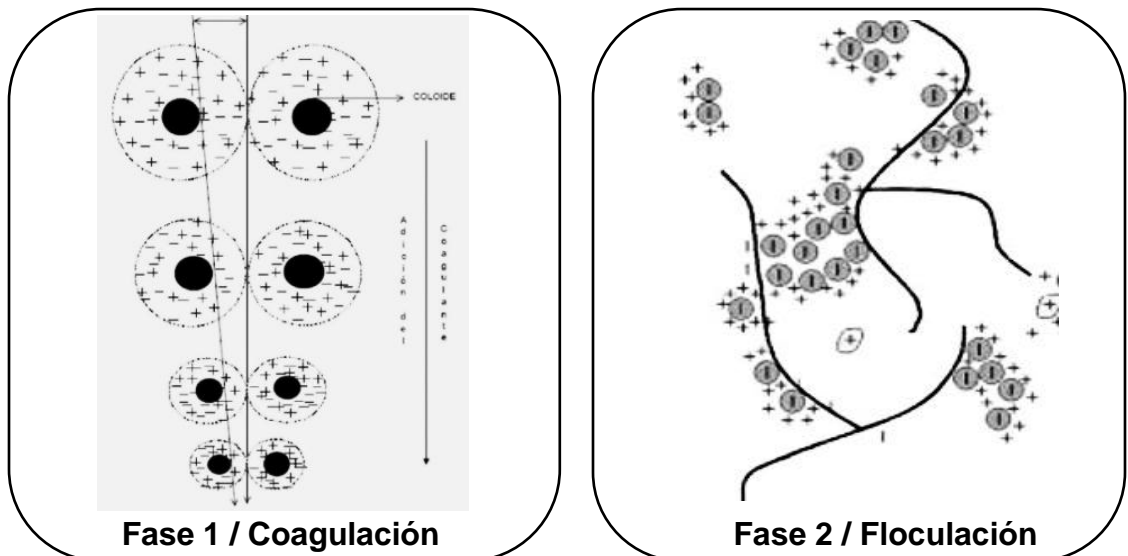
La coagulación es un proceso de desestabilización de coloides al neutralizar las fuerzas que los mantiene separados. Esto se logra aplicando coagulantes químicos y energía por medio de mezclado. Las sustancias químicas de uso común son las soluciones catiónicas, polímeros catiónicos con aluminio hidrolizado, sales de aluminio y de hierro. (Kemmer y McCallion, 2001, p. 80-81)

1.5.2. Fase 2: proceso de floculación

Según Kemmer y McCallion (2001):

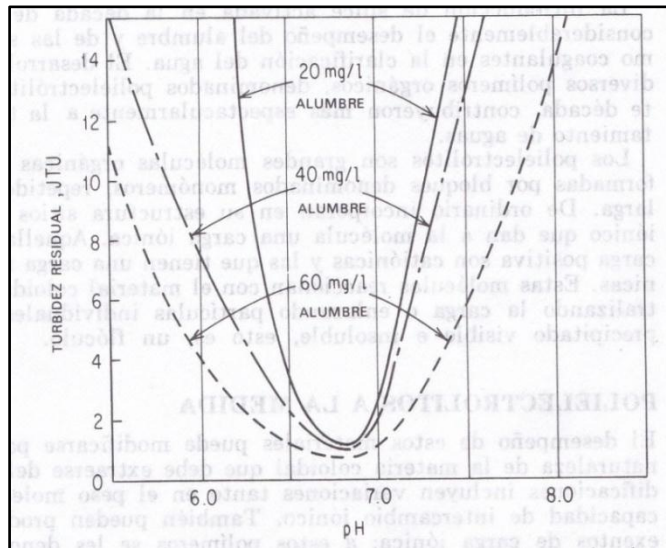
Un flóculo puede ser formado por la aglomeración de varios coloides en la coagulación no sea lo bastante grande como para asentarse y disponer de él con la rapidez deseada. Un floculante reúne partículas floculadas en una red, formando puentes de una superficie a otra y enlazando las partículas individuales en aglomerados. El alumbre, las sales de hierro y los polímeros de peso molecular alto son floculantes comunes. La floculación es estimulada por un mezclado lento que junta poco a poco los flóculos; un mezclado demasiado intenso los rompe y raramente se vuelven a formar en su tamaño y fuerza óptimos. (p. 84)

Figura 2. Ilustración molecular de la coagulación y la floculación



Fuente: Kemmer y McCallion (2001). *Manual del agua. Su naturaleza, tratamiento y aplicaciones.*

Figura 3. Efecto de la dosificación del coagulante y el pH sobre la turbiedad residual (efecto del sulfato de aluminio)



Fuente: Kemmer y McCallion (2001). *Manual del agua. Su naturaleza, tratamiento y aplicaciones.*

1.6. Clasificación de agentes coagulantes-floculantes

“Históricamente, los coagulantes metálicos (el alumbre y las sales de hierro, han sido los más empleados en la clarificación del agua” (Kemmer y McCallion, 2001, p. 86). Posteriormente se propuso el uso de polímeros orgánicos sintéticos como coagulantes y floculantes, sin embargo, con la ayuda de la tecnología se están desarrollando productos coagulantes y floculantes combinados de origen natural por medio de extractos botánicos que sean solubles en agua, como el agente Ecoclean 2300, para formar una matriz orgánica que se combine con iones positivos para formar flóculos estables. Estos agentes contienen el mismo principio activo, para clarificación de agua, que los polímeros orgánicos de origen sintético antes descritos (*Eco Health Products Private Limited, 2018*).

1.6.1. Coagulante-floculante inorgánico (clarificador ClearAqua con aluminio hidrolizado)

Descripción según AquaSistemas (2018):

El clarificador Clear Aqua proporciona un aspecto cristalino al agua. Reúne las partículas de suciedad del agua y las aglomera en el fondo de la piscina. Complementa la filtración y la aspiración de la suciedad del agua.

Especificaciones

- Producto biodegradable que no persiste en el medio ambiente.
- Concentración de Clorhidróxido de Aluminio al 10 %.
- No requiere precauciones especiales para su manejo. (párr. 1-2)

1.6.2. Coagulante-floculante formulado con extractos de origen natural (Ecoclean 2300)

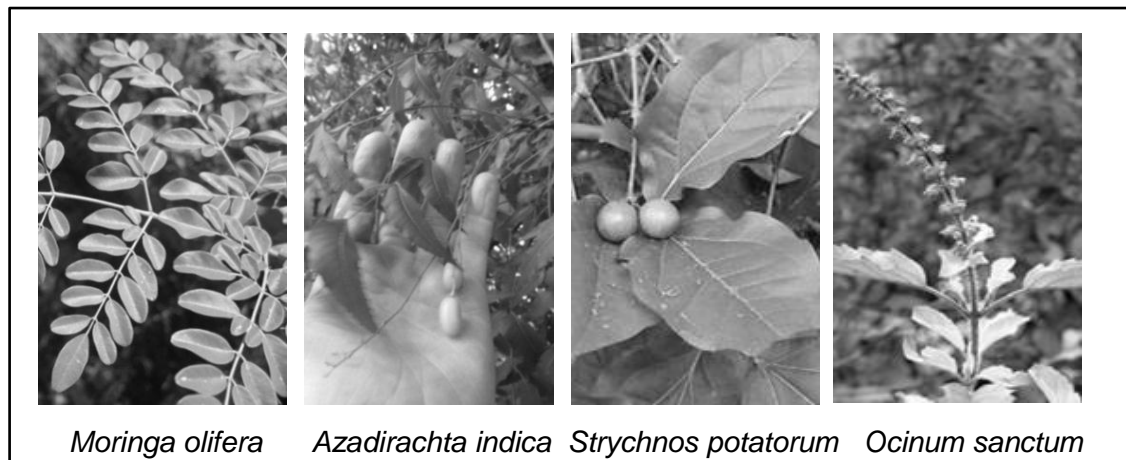
Descripción según *Eco Health Products Private Limited* (2019).

Ecoclean-2300 es una fórmula de tratamiento de agua única. Es una combinación de extractos de hierbas (Neem, Thulasi, Moringa y Tuerca limpiadora) con capacidades comprobadas de purificación de agua, unidos mediante un solvente orgánico soluble en agua. Es totalmente no tóxico y seguro de usar. (párr. 5)

Los polímeros de cadena larga y proteínas de alto peso molecular de estos compuestos naturales se extienden y forman uniones débiles por medio de enlaces de puentes de hidrógeno y fuerzas de *Van Der Waals* (fuerzas de estabilización molecular y enlaces no covalentes) para formar flóculos mayores y promover la precipitación (*Eco Health Products Private Limited, 2018*).

Con base en lo anterior, este es un resultado de investigación científica aplicado a tratamiento de aguas residuales, aguas altamente contaminadas y para tratamiento de agua potable por medio de polímeros orgánicos de cadena larga y proteínas de alto peso molecular de origen botánico. Descrito para precipitar iones como calcio, hierro, magnesio, fosfatos, sólidos suspendidos y disueltos en el agua, además de eliminación de bacterias como coliformes totales y *Escherichia coli*, hongos y algas (*Eco Health Products Private Limited, 2018*).

Figura 4. **Especies botánicas que componen el agente Ecoclean 2300**



Fuente: Berdonces (2010). *Diccionario ilustrado de las plantas medicinales*.

1.6.3. Comparación de agentes coagulantes-floculantes polímero catiónico con aluminio y Ecoclean 2300

La floculación es importante en sistemas que generan lodos ya que no solo incrementa el tamaño de las partículas del flóculo, aumenta la concentración de sólidos y por consiguiente el volumen de lodos, sino que también afecta su naturaleza física (Kemmer y McCallion, 2001, p. 84).

Cuando los productos con aluminio se añaden al agua, esta reacción de hidrólisis produce aluminio gelatinoso insoluble forma flóculos y enreda a los coloides en una matriz gelatinosa más grande, gracias a su alto peso molecular, precipita al fondo del sistema formándose la fase sólida/líquida. Sin embargo, los lodos voluminosos producidos por coagulantes metálicos crean problemas de disposición, por lo que una labor ordinaria como el secado se dificulta cuando se utilizan centrifugas prensas para filtrar, patios de secado, hornos y otros dispositivos desecadores. (Kemmer y McCallion, 2001, p. 86)

Cabe mencionar que *Moringa olifera* tiene propiedades antimicrobianas documentadas por científicos guatemaltecos (Cáceres *et al.*, 1991) y actividad antifúngica (Chaung *et al.*, 2007). Sin embargo, “un hallazgo muy importante fue la actividad antimicrobiana específica de los extractos de semilla de moringa sobre los agentes causantes de la fiebre tifoidea (*Salmonella typhi*), cólera (*Vibrio cholerae*) y la gastroenteritis (*Escherichia coli*)”. (Walter, Samuel, Peter y Joseph, 2011, p. 5).

Con base en los hallazgos descritos anteriormente, se propone una ventaja importante al momento de seleccionar agentes para clarificación de agua residual de tipo ordinario y potable. Si se selecciona un agente que contenga en su formulación extractos botánicos, realizará varias funciones como: coagulante, floculante, bactericida, fungicida y control de algas (*Eco Health Products Private Limited*, 2018). “Un producto orgánico natural presenta ventajas al compararlo con compuestos de aluminio, ya que su limitación como agente bactericida y fungicida puede aumentar el costo de operación al utilizar un agente desinfectante como cloro” (Torrellas Hidalgo, 2013, p. 7). Lo anterior se describe en la tabla III.

El uso indiscriminado de sulfato de aluminio en altas concentraciones de aluminio en el agua y el suelo pueden ser perjudiciales para la salud humana y el ambiente, ya que en el suelo la movilidad del aluminio es mínima, por el pH y porque el aluminio forma un enlace covalente con las proteínas que están presentes en el medio, por lo cual permanece de forma insoluble. (Mavar Química, 2009, p. 4)

Según Mavar Química (2009):

Deben tenerse presente la legislación ambiental local vigente para realizar la disposición más adecuada. Una alternativa para la eliminación del producto es mezclarlo con un solvente combustible, luego incinerar en un incinerador químico de doble cámara de combustión equipado con un dispositivo para tratamiento de gases de chimenea. (p. 4)

Tabla III. Comparación de parámetros entre los floculantes utilizados

Parámetro	Polímero con aluminio	Ecoclean 2300
Composición química Fórmula molecular	$[AlO_4Al_{12}(OH)_{24} \cdot (H_2O)_{12}]^{7+}$	No disponible Combinación de extractos botánicos solubles en agua de <i>Azadarichta indica</i> , <i>Moringa olifera</i> , <i>Strychnos potatorum</i> y <i>Ocinum sanctum</i>
Carácter iónico	Catiónico Al^{3+}	Catiónico
Aplicar en dilución	No	No
pH óptimo	7.5-8.2	6.5-8.5
Solubilidad	soluble	soluble
Dosis óptima	Según OMS, 2-5 mg/L Según fichas técnicas Aguas potables 25-30 mg/L Aguas residuales altamente contaminadas 50-2000 mg/L	Según ficha técnica Aguas potables 10 mg/l Aguas residuales altamente contaminadas 30 mg/l
Subproductos de descomposición peligrosos	Cuando este producto es combinado con amonio o amoniaco	Ninguno
Mecanismo de acción (fundamento)	Clarificación del agua mediante neutralización de cargas, adsorción y atrapamiento. Precipitación de macropartículas que no son eliminadas por filtración.	Coagulante-floculante catiónico para neutralizar cargas, desinfectante bactericida, fungicida y control de algas. Proteínas y polímeros para floculación y sedimentación.
Parámetros fisicoquímicos que remueve del agua	Clarificación de agua, fosfatos, solidos suspendidos, así como disueltos, color y turbiedad.	<i>Azadarichta indica</i> desinfectante, antibacteriano con propiedades coagulantes, reduce solidos disueltos <i>Moringa olifera</i> floculante, aumenta la sedimentación, propiedades antibacteriales, reduce solidos suspendidos, DQO <i>Strychnos potatorum</i> floculante y reductor de la turbiedad <i>Ocinum sanctum</i> desinfectante y oxigenador, reduce DBO En combinación reducen iones catiónicos como calcio, magnesio, hierro y fosfatos

Continuación tabla III.

Parámetro	Polímero con aluminio	Ecoclean 2300
Biodegradación	Persistencia del aluminio tanto en los cuerpos de agua como en los sólidos (lodos). Aluminio unido a proteínas por enlaces covalentes (peligro en lodos, aguas y suelo), aluminio insoluble.	Este contiene polímeros orgánicos de cadena larga y proteínas de plantas que se pueden biodegradar con la acción de la luz solar y el ambiente en el cuerpo de agua después de cumplir su función.
Contra microorganismos	Ligeramente antiséptico	Control de algas, fungicida, bactericida contra coliformes totales, <i>Escherichia coli</i> , <i>Salmonella typhii</i> y <i>Vibrio cholerae</i>
Campo de acción	Industria de la pulpa y papel, aguas residuales y aguas potables	Aguas residuales de tipo ordinario y aguas potables
Uso del agua tratada con los agentes	<p>Agua potable y agua residual tratadas, si no cumplen con el análisis de microbiología (AG número 236-2006 y COGUANOR NTG 29001), después de la desinfección no se pueden distribuir para los siguientes fines.</p> <p>No distribución para agua potable, no recomendable para uso en agricultura de frutos y hortalizas.</p> <p>Agua residual tratada recomendada para construcción, usos industriales y recirculación de procesos (descargas de sanitarios)</p>	<p>Erradicación de las poblaciones bacterianas, documentado para <i>Escherichia coli</i>, hongos y control de algas. Cumplen con el análisis de microbiología (AG número 236-2006 y COGUANOR 29001).</p> <p>El agua tratada cumple con parámetros de agua potable. El uso del agua es seguro y reutilizable, recomendado para jardinería, riego, construcción, usos industriales, aire acondicionado, plantas y todos los usos secundarios.</p>

Continuación tabla III.

Parámetro	Polímero con aluminio	Ecoclean 2300
Formación de flóculo (fase sólida/líquida)	Tiempo de formación del flóculo 20 minutos, tiempo de acción 30 minutos. Separación incompleta del sólido. Aplicación de energía por medio de agitación a 100 PRM y centrifugación.	Tiempo de formación del flóculo 5 minutos, tiempo de acción 15 minutos. Separación completa del sólido. Aplicación de energía por medio de agitación a 30 PRM.
	Floculo altamente susceptible al pH y a las concentraciones de Aluminio.	Flóculo no susceptible al pH por contener moléculas de extractos naturales, proteínas actúan en un rango mayor de pH.
Productos secundarios (lodos)	Alto contenido de agua. Aspecto gelatinoso (flóculo de aluminio). Complicaciones con el secado, uso de maquinaria y procesos para disminuir su volumen.	Menor contenido de agua. Proceso eficiente al momento de utilizar maquinaria o procesos térmicos de secado. Mayor concentración de sólidos y lodos.

Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de Kemmer y McCallion (2001). *Manual del agua. Su naturaleza, tratamiento y aplicaciones.*, Eco Health Products Private Limited (2018). *Water treatment Chemical, Organic Products.*, Mavar Química (2009). *Producción de alumbre potásico. Ficha técnica y de seguridad.* E Industria Sulfúrica S. A. (2014). *Sulfato de aluminio. Ficha técnica y de seguridad.*

1.7. Separación de la fase sólida/líquida en la PTAR

Después de utilizar procesos de gravedad, estanques de sedimentación y/o agentes coagulantes-floculantes como sulfato de aluminio o Ecoclean 2300, la separación de la fase sólida/líquida en el tratamiento de aguas incluye los procesos de remover los sólidos que estaban suspendidos en el agua mediante sedimentación, colado, flotación y filtrado; también se incluye para los sólidos, espesamiento y desecamiento por gravedad (Kemmer y McCallion, 2001).

La selección de los procesos específicos o combinados para eliminar del agua a los sólidos suspendidos depende del carácter de los sólidos, su concentración y claridad del filtrado a obtener. Los sólidos grandes y pesados pueden retirarse por medio de un enrejado. Para sólidos finos se puede implementar sedimentación con sulfato de aluminio o agente Ecoclean 2300 y filtración con el apoyo de filtros percoladores (Kemmer y McCallion, 2001).

Figura 5. Tanque de sedimentación y filtros percoladores en planta Santa Isabel II, año 2018



Fuente: Municipalidad de Villa Nueva. *Rehabilitación de plantas de tratamiento*. Consultado el 10 de junio de 2019. Recuperado de <https://www.villanueva.gob.gt/rehabilitan-planta-tratamiento-santa-isabel-fotos>

1.8. Aprovechamiento de lodos

Los lodos deben ser gestionados correctamente de acuerdo con la legislación local sobre este tipo de residuos y respetando la siguiente jerarquía propuesta de residuos: minimización de su generación, la reutilización, reciclado y otro tipo de valorización (incluida la valorización energética) y eliminación adecuada en vertedero de las cenizas. (Elías, 2012, p. 984)

1.8.1. Tratamiento agrícola

Estas líneas de investigación están orientadas al uso de lodos como compostaje, al ser utilizados con otros materiales de características similares y con alto contenido de Carbono hasta lograr una relación carbono/nitrógeno (C/N) aceptable. Sin embargo, este producto no es muy conocido como el compostaje creado a base de residuos de sólidos urbanos y agropecuarios. Además, con esta mezcla no se evita el problema potencial de contaminación por metales pesados (Colomer Mendoza, Alberola, Prats, Izquierdo y Bovea, 2009).

1.8.2. Tratamiento energético

La valorización energética es una vía de eliminación en donde es necesario deshidratar el lodo y asimilarlo como un combustible derivado de residuos siempre que su poder calorífico sea atractivo frente a otros combustibles o en la misma línea de investigación, en el uso de fuentes de energía no convencionales (Colomer Mendoza *et al.*, 2009).

1.8.3. Tratamiento en cementeras

Se realiza la gestión con cementeras para que el lodo forme parte del granulo resultante y forme parte desde el proceso de secado térmico de fangos. Es una alternativa que ha obtenido resultados óptimos y rentables a nivel económico como medioambiental, frente a la descarga en vertedero. Cabe destacar que se ha documentado que la calidad del cemento no se perjudicada (Cabildo de Tenerife, España, 2007).

1.8.4. Tratamiento por vertedero controlado

Como último recurso si el lodo no puede ser utilizado en los escenarios anteriores se destinará a un vertedero, sin embargo, esto conferiría un alto precio a esta práctica ya que se destinaría un espacio físico y recursos al depósito como vertedero. Por eso para esta etapa se necesita de operaciones previas como deshidratación mecánica o solar, para una correcta gestión y optimización del espacio en el vertedero (Cabildo de Tenerife, España, 2007).

1.9. Fuentes de energía

Según Roldán Vilorio (2013), las fuentes de energía son los recursos existentes en la naturaleza de los que la humanidad puede obtener formas de energía utilizable en sus actividades. Las fuentes de energía se clasifican en tres grandes grupos: renovables y no renovables; según sean recursos ilimitados o limitados, según su incidencia en la economía del país (convencionales y no convencionales) y según su utilización (primaria, secundaria y terciaria).

1.9.1. Fuentes de energía no convencionales

Son fuentes de energía renovables que no provienen del petróleo. Estas incluyen el viento, el sol, la energía almacenada como energía interna en el aire (aerotérmica), debajo de la superficie de la tierra (geotérmica) y en el agua (hidrotérmica), la energía de los océanos, la hidráulica, la biomasa, los gases producidos de los rellenos sanitarios y plantas de tratamiento de aguas residuales, y los biogases. (Narváez Rincón, 2010, p. 169)

1.10. Uso de lodos generados en PTAR como fuentes no convencionales de energía

Existen muchos procesos térmicos para la destrucción de los contaminantes de los lodos (y hacerlos inertes) y, a su vez, producir materia prima combustible como: gasificación, pirolisis, oxidación supercrítica, oxidación térmica con plasma o utilizado directamente como combustible sólido, que se postula como la práctica más sencilla (Elías, 2012).

1.11. Poder calorífico de lodos

El poder calorífico es la cantidad de energía que se produce en la combustión completa del carburante, el cual se lleva hasta la formación de CO₂ y agua a una unidad de masa o de volumen. El poder calorífico depende de la naturaleza química del combustible y se caracteriza como superior (PCS) e inferior (PCI) (Wauquier, 1994).

Cabe destacar que el PCS se obtiene cuando toda el agua resultante de la combustión es líquida y el PCI se obtiene cuando toda el agua resultante de la combustión es gaseosa. El PCS excede al PCI porque incluye la energía necesaria para evaporar esa agua líquida. (Moran y Shapiro, 2005).

1.12. Incineración de lodos como tratamiento final

Para Shen y Zhang (2005), la combustión controlada es un proceso en el que la fracción orgánica de los lodos, fangos o biosólidos, potencialmente contaminante, se transforma en materia inerte. No es un sistema de eliminación completo, pero realiza reducción de la masa y volumen del material original, además de recuperar energía calorífica para procesos industriales.

1.12.1. Combustión de lodos en calderas

Para Torres Carranza (s.f.), los lodos generados en plantas de tratamiento de agua residual de tipo ordinario, dependiendo de su eficiencia energética, pueden ser tratados como combustible derivado de residuos para industrias que trabajen con sistemas de recuperación de energía eléctrica, mecánica y calorífica (incineración). Esta biomasa alternativa se puede compactar a través del procesamiento de secado con prensas mecánicas (tabiques) y se secan al sol para aumentar su eficiencia energética o depositar directamente a las calderas con un contenido de humedad menor al 10 %.

Una opción de tratamiento segura para lodos que fueron generados por medio de sulfato de aluminio consiste en unir el lodo con un combustible e incinerarlo en un incinerador químico de doble cámara de combustión acoplado a un dispositivo de gases de chimenea. (Mavar Química, 2009, p. 4)

1.13. Impacto ambiental

Según Gómez Orea y Gómez Villarino (2013), es la alteración que introduce la actividad humana en su entorno. Se puede interpretar en términos de bienestar y salud para el ser humano, o de la calidad de vida de la población desde el punto de vista más general. También Pardo Buendía (2002), indica que se puede definir como la interrelación de las sociedades con su base biofísica que evalúa la diferencia entre la evolución de un proceso en el tiempo que tendría un determinado entorno, o alguno de los factores constituyentes, con y sin la acción humana que provoca o provocará esta diferencia.

1.13.1. Instrumentos ambientales

El Acuerdo Gubernativo número 137-2016, Reglamento de control y seguimiento ambiental, “son documentos técnicos en los cuales se encuentra contenida la información necesaria para realizar una identificación y evaluación ordenada de los impactos o riesgos ambientales de un proyecto, industria, obra o actividad” (p. 3).

Existen instrumentos ambientales para cada una de las actividades que se desarrollan en el país, así el bajo impacto ambiental potencial tiene un instrumento predictivo que es la evaluación ambiental inicial (EAI) y un instrumento correctivo, que es el diagnóstico ambiental de bajo impacto (DABI). Mientras que el alto impacto ambiental potencial está basado en la evaluación de impacto ambiental (EIA) como instrumento predictivo y el diagnóstico ambiental como instrumento correctivo (Acuerdo Ministerial número 199-2016, Listado taxativo de proyectos, obras, industrias o actividades).

En relación con las categorías de los proyectos respecto del impacto ambiental, estos se clasifican en AMI: Mínimo impacto ambiental potencial, C: Bajo impacto ambiental potencial, B2: Bajo a moderado impacto ambiental potencia, B1: Moderado a alto impacto ambiental potencial, A: Alto impacto ambiental potencial, MP: Proyectos de alcance nacional o regional. (Acuerdo Ministerial número 199-2016, Listado taxativo de proyectos, obras, industrias o actividades, p. 3)

Para saber cuál es la categoría que corresponde a un proyecto se utiliza el listado taxativo, que es un documento que contiene la enumeración y clasificación de los proyectos, obras, industrias o actividades, que involucran el impacto ambiental potencial o riesgo ambiental (deterioro ambiental o introducción de modificaciones perjudiciales al suelo, cuerpos de agua, bosque u otros recursos naturales) (Acuerdo Ministerial número 199-2016, Listado taxativo de proyectos, obras, industrias o actividades).

1.13.2. Impacto ambiental de las plantas de tratamiento de aguas residuales urbanas de tipo ordinario

En el listado taxativo las plantas de tratamiento de aguas residuales domesticas están agrupados en la sección E, división 37, grupo 370, catalogados como evaluación de aguas residuales. Este listado define a esta actividad como el diseño, construcción y operación de empresas que desarrollan proyectos de gestión de sistemas de alcantarillado, colectores subterráneos y de instalaciones de captación, tratamiento y eliminación de aguas residuales. (Acuerdo Ministerial número 199-2016, Listado taxativo de proyectos, obras, industrias o actividades, p. 13)

“Los impactos ambientales clasificados para estos sistemas es el B1: De alto a moderado impacto ambiental potencial, para todos los proyectos” (Acuerdo Ministerial número 199-2016, Listado taxativo de proyectos, obras, industrias o actividades, p. 13).

1.13.3. Impacto ambiental por el uso de polímeros de aluminio en aguas residuales

Según Torrellas Hidalgo (2013), “las fuentes de exposición no ocupacional al aluminio son alimentos, el agua, las bebidas, los aditivos, los envases y los utensilios utilizados durante la preparación de los alimentos” (p. 6). Sin embargo, las sales de aluminio y de hierro fueron los primeros agentes utilizados como coagulantes, por su eficacia y bajo costo en el tratamiento de aguas residuales y para consumo humano (Kemmer y McCallion, 2001).

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS) (2006), “el floculo precipitado retira los contaminantes suspendidos y disueltos mediante mecanismos de neutralización de carga, adsorción y atrapamiento. Se debe de seleccionar una dosis optima que logre una reducción suficiente del color y la turbiedad” (p. 150).

Los valores máximos permitidos de aluminio en las aguas de consumo humano se consideran seguros, sin embargo, se ha estudiado una correlación entre la concentración de aluminio y la aparición a una temprana edad de la enfermedad de Alzheimer en los seres humanos (Torrellas Hidalgo, 2013). La OMS (2006), “confirmó una concentración de 0.20 mg/L en el agua de consumo como valor de compromiso entre la utilidad del uso de sales de aluminio en el tratamiento de agua y el objetivo de evitar la cloración del agua” (p. 247-248).

El mecanismo de acción por el cual afecta el aluminio al ser humano es de competencia con los iones calcio, hierro y en especial el magnesio, lo que provoca una sustitución en las proteínas en el sitio de unión de los metales. (Pérez, Vittori, Garbossa y Nesse, 2002, p. 4)

Estudios han documentado efectos de carácter degenerativo en el tejido cerebral y conexiones nerviosas, lo que se traduce en daños al sistema nervioso central, demencia, pérdida de la memoria, apatía y temblores severos. Sin embargo, los resultados a largo plazo de las personas, que se sabe, han estado expuestas a dosis altas de aluminio aún se evalúan (Pérez, *et al.*, 2002; Razabel, Mercero, López y Ugalde, 2007; Guo y Wang, 2011).

La persistencia del aluminio, tanto en los cuerpos de agua como en los sólidos (lodos) formados en el tratamiento de aguas residuales de tipo ordinario y agua potable, es preocupante ya que no hay una adecuada disposición final de los lodos a nivel local y si estos son utilizados para abono en zonas periféricas de las ciudades donde el aluminio estaría llegando a la población por medio del consumo frutales y hortalizas, ya que estos alimentos actúan como biofiltros (Guo y Wang, 2011).

Según Villegas, Castaño y Paredes Cuervo (2005), “la extracción de aluminio en lodos de plantas de tratamiento de potabilización por medio de ácido sulfúrico concentrado alcanza porcentajes de recuperación entre 18 - 64 % y soluciones con concentraciones entre 8.90 y 1 510 mg Al/L” (p. 223).

Debe tenerse presente la legislación ambiental local vigente para realizar la disposición más adecuada. Una alternativa para la eliminación del producto es mezclarlo con un solvente combustible, luego incinerar en un incinerador químico de doble cámara de combustión equipado con un dispositivo para tratamiento de gases de chimenea. (Mavar Química, 2009, p. 4)

1.13.4. Impacto ambiental por el uso del agente orgánico Ecoclean 2300

Actualmente y por las razones indicadas anteriormente se está tratando de minimizar el uso de sales metálicas para clarificación del agua, por agentes floculantes orgánicos que no evidencien toxicidad para la salud humana y el ambiente (Ledó, 2009). “La utilización de coagulantes naturales alternativos es comparable al sulfato de aluminio, pudiendo ser utilizada como coagulante eficaz para la depuración de agua con baja turbiedad” (Ledó, 2009, p. 9).

Ejemplo de un producto de origen natural según *Eco Health Products Private Limited* (2019):

Ecoclean-2300 es una fórmula de tratamiento de agua única. Es una combinación de extractos de hierbas (Neem, Thulasi, Moringa y Tuerca limpiadora) con capacidades comprobadas de purificación de agua, unidos mediante un solvente orgánico soluble en agua. Es totalmente no tóxico y seguro de usar. (párr. 5)

Con base en lo anterior, estas moléculas están unidas entre sí por medio de un solvente orgánico soluble en agua. Estas formulaciones carecen de productos químicos como solventes inflamables, moléculas que no sean biodegradables, derivados de petróleo, metales pesados y otras sustancias que puedan ser perjudiciales para la salud humana y el ambiente, por lo que se considera no tóxico y seguro de usar. (*Eco Health Products Private Limited*, 2018).

Según Ledó (2009) y Sánchez (2010), estas moléculas (polímeros y proteínas de alto peso molecular) están ampliamente distribuidas en la naturaleza, específicamente en los tejidos vegetales como las hojas, frutos, raíces y cortezas de los árboles. Además, son producidos de forma natural, no solo por las plantas, sino por todos los organismos vivientes del planeta y representan una alternativa que aún no está descrita en su totalidad. Aunque los estudios presentados hasta el momento no han documentado efectos adversos a la salud humana y al ambiente.

1.14. Diseño técnico de la planta de tratamiento tipo biológica secundaria Santa Isabel II

“La planta utiliza un tratamiento secundario para las aguas y está compuesta básicamente por sedimentadores, filtros percoladores, digestor de lodos y patios de secado de lodos” (AMSA, 2001, p. 232).

Una diferencia notable en la composición de las aguas naturales comparada con la de las aguas de desecho, es el contenido de materia orgánica presente en éstas últimas. Sin embargo, el diseño técnico de estas plantas de tratamiento se centra en este material orgánico que es biodegradable y muy asimilable por otros microorganismos que lo emplean para su beneficio y al metabolizarlo lo convierten en células o biomasa adicional y en otras sustancias más simples químicamente hablando, que ya no son de carácter repulsivo y rechazable para la sociedad (Elías, 2013).

Tabla IV. **Resumen del diseño técnico de la planta Santa Isabel II**

Generalidades	
Ubicación	Colonia Santa Isabel II al final de la 1ª. Av. y 22 calle, sector La Independencia. Ingreso principal está en la ruta CA-9 km 19.5 ruta al Pacífico.
Localización geográfica	Latitud 14°31'30'' N y Longitud 90°36'11.67'' W
Tecnología	Planta de tratamiento secundario para aguas residuales de tipo ordinario (planta biológica de tipo secundario).
Contexto ambiental	El terreno es quebrado por lo que la planta fue construida para que los sistemas funcionen por gravedad. La descarga del cuerpo receptor se convierte en el afluente del río Platanitos y este a su vez es río tributario principal del río Villalobos.
Elementos de la planta de tratamiento	
Tramo final alcantarillado	Posee una descarga hacia la planta de tratamiento que ingresa directamente al canal desarenador
Canal desarenador	Ancho de 1.78 m y una longitud de 25.70 m con una cortina central de concreto. Posee rejillas metálicas para la retención de sólidos
Sedimentador primario	Existen dos unidades de sedimentación primaria en forma cónica, con un diámetro exterior en la parte superficial de 13.3 m y un canal de recolección del efluente dentro del sedimentador de 0.50 m de ancho. Posee una rampa central metálica. Para atrapar grasas posee una estructura en la parte central de 3.80 x 3.80 m, enlazada a una tubería de desfogue del canal desarenador
Filtros percoladores I y II	Posee un canal de distribución hacia 4 filtros percoladores de similares características y dimensiones colocados en serie y en parejas para que cada pareja reciba el caudal proveniente de un sedimentador primario. Cada uno de los filtros percoladores se compone de cuatro módulos filtrantes cuyas dimensiones son de 5.20 x 8.20 m, con una altura de 5.45 m y la dimensión total de cada filtro es de 20.80 x 8.20 m. Cada uno de los módulos de los filtros tiene 4 tubos aspersores de PVC de 3 pulgadas que distribuyen uniformemente los caudales de la unidad anterior.
Sedimentador secundario	Posee las mismas características físicas que los sedimentadores primarios, e iguales dimensiones.
Digestor de lodos	Existen dos estructuras de concreto, de sección rectangular de 5.40 x 24.45 m. la profundidad del digestor es de 6 m.
Patio de secado de lodos	Existen 3 patios de secado de lodos, cuyas dimensiones aproximadas son de 8 x 10 m y todos los patios están comunicados por un canal.

Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de AMSA (2001). *Estudio de diagnóstico y plan de rehabilitación de dieciocho plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas, Informe final.*

1.15. Nuevas tecnologías de tratamiento de aguas residuales

La gran parte de tecnologías utilizadas por la mayoría de países en vías de desarrollo y emergentes para el tratamiento de aguas residuales de tipo ordinario deriva de tecnologías ya existentes. Sin embargo, presenta una buena oportunidad para asumir el reto de implementar tecnologías eficientes debido al valor económico que podría generar el agua residual como recurso hídrico alternativo (Elías, 2012).

1.15.1. Sistema de flotación por aire disuelto

El sistema de flotación de aire disuelto (DAF) por sus siglas en inglés *Dissolved Air Flotation*, los sólidos suspendidos se separan de la solución por medio de microburbujas de aire, en una solución sobresaturada. Los sólidos se adhieren a las microburbujas en su recorrido ascendente flotando hacia el sistema de separación superior (Bolaño Ennis, 2009).

El principio físico radica en una zona de contacto que une a los agentes floculantes y las microburbujas de aire para colisionar y realizar una unión momentánea que se denomina burbuja-floculo, la cual puede ascender hasta la superficie del tanque. En la superficie del tanque se forma una capa flotante compuesta de una mezcla de burbujas y partículas floculares que han sido arrastradas por estas. Con el tiempo esta capa de flotados se concentra produciendo un lodo que se retira del tanque por medio de un sistema de barrido superficial (Bolaño Ennis, 2009).

1.15.2. Sistema de decantación lamelar

Según *Toro Equipment* (2009):

Funciona como sistema de pretratamiento en aguas residuales urbanas e industriales. En urbanas, reducción de aceites y grasas hasta del 60 % de carga contaminante. En el tratamiento fisicoquímico en aguas industriales sirve como separador sólido/líquido (mataderos, lácteas, papeleras, minería, farmacéutica, tratamiento de superficies, industria de madera, biocombustibles, textil, aceites vegetales y conservas de pescado). (p. 10)

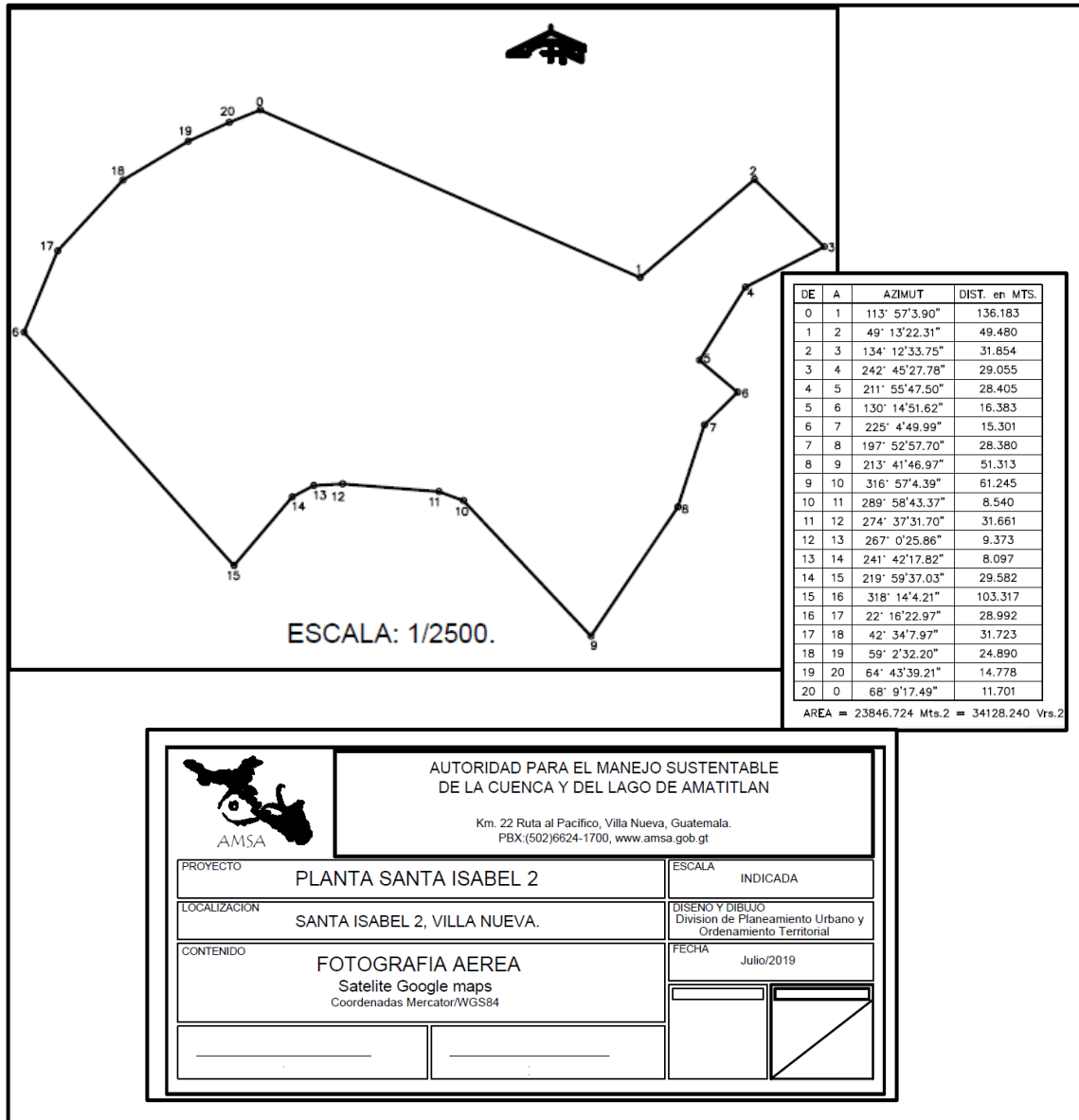
2. CARACTERIZACIÓN DE LODOS GENERADOS CON LOS AGENTES FLOCULANTES, INVENTARIO Y POTENCIAL ENERGÉTICO

2.1. Localización geográfica de la planta de tratamiento

Según el diagnóstico y plan de rehabilitación de dieciocho plantas de tratamiento de aguas residuales domesticas por medio de AMSA:

La planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR), se encuentra en jurisdicción del municipio de Villa Nueva del departamento de Guatemala, localizada en la Colonia Santa Isabel II al final de la 1ª. Av. y 22 calle, sector conocido como La Independencia. El ingreso principal está a la altura del Km 19.5 en la ruta CA-9 que conduce hacia el Pacífico. La colonia beneficiaría colinda al Sur y al Este con viviendas, al norte y al oeste con un terreno accidentado y el caudal de las aguas servidas desemboca en el río Platanitos, que es afluente del río Villalobos. (AMSA, 2001, p. 231)

Figura 6. Localización y área de la planta de tratamiento Santa Isabel II



Fuente: AMSA (2019). *Estudio de diagnóstico y plan de plan de mejora de la planta Santa Isabel II, Informe final.*

Figura 7. **Planta de tratamiento de tipo biológica secundaria Santa Isabel II**



Fotografías tomadas en la planta de tratamiento Santa Isabel II.

a-b. Ejemplo de la medición del caudal. **c.** Elementos de la PTAR (afluente, reja para sólidos, canal desarenador). **d.** cono sedimentador con trampa de grasas.

Fuente: elaboración propia. Planta de tratamiento Santa Isabel II.

2.2. Fase de campo y recolección de muestras

La fase de campo (figura 7), constó de la caracterización del afluente de la planta de tratamiento por medio de 10 repeticiones distribuidas durante marzo y abril de 2019.

En la tabla V y en el apartado de apéndices se detallan las colectas realizadas de las muestras.

Tabla V. **Muestras para caracterización del afluente de la planta Santa Isabel**

Réplica	Fecha	Hora	ID AMSA
1	14/03/2019	10:40:00 a.m.	190237
2	15/03/2019	10:20:00 a.m.	190238
3	19/03/2019	10:45:00 a.m.	190253
4	21/03/2019	10:40:00 a.m.	190277
5	22/03/2019	1:38:00 p.m.	190280
6	27/03/2019	3:20:00 p.m.	190319
7	29/03/2019	3:21:00 p.m.	190320
8	02/04/2019	3:23:00 p.m.	190345
9	04/04/2019	3:19:00 p.m.	190350
10	05/04/2019	3:34:00 p.m.	190351

Fuente: elaboración propia según la base de datos de ingreso de muestras del laboratorio de aguas y sólidos de AMSA.

2.3. Caracterización del afluente de la planta de tratamiento de aguas residuales de tipo ordinario Santa Isabel II

La caracterización del afluente de la planta de tratamiento se realizó *in situ* (figura 7) y se determinaron los parámetros contenidos en el Acuerdo Gubernativo número 236-2006 y otros parámetros de interés para el estudio, los cuales fueron los siguientes:

- Parámetros *in situ*, potencial de hidrogeno (pH) (forma parte del Acuerdo Gubernativo número 236-2006).
- Parámetros *in situ*, sólidos disueltos totales (mg/L).
- Medición *in situ* de caudal en litros/segundo (L/s).

2.4. Determinación de pH y sólidos disueltos totales

- La determinación del pH se realizó por medio de la metodología del *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 23rd. Edition*, sección 4500 B.
- La lectura del pH se realizó por medio de medición electroquímica potenciómetro portátil HACH HQ 30d.
- La determinación de los sólidos suspendidos totales se realizó por medio de la metodología del *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 23rd. Edition*, sección 2510 B.
- Se realizó por medio de medición electroquímica acoplada a sonda WTW Cond 3210.

2.5. Determinación del caudal del afluente de la planta de tratamiento

- Como lo indica la figura 9, esta metodología fue estandarizada por el laboratorio de aguas y sólidos (POE-AMSA-02-005, Estimación de caudal y métodos de aforo) de la división de control, calidad ambiental y manejo de lagos de la autoridad para el manejo sustentable de la cuenca y del lago de Amatitlán (AMSA).
- La medición del caudal de afluente de la planta de tratamiento Santa Isabel II se realizó por medio del procedimiento de la velocidad media de flujo con caudalímetro HACH FH 950 (con sensor y controlador de flujo continuo), se realizó como lo indica la figura 8.

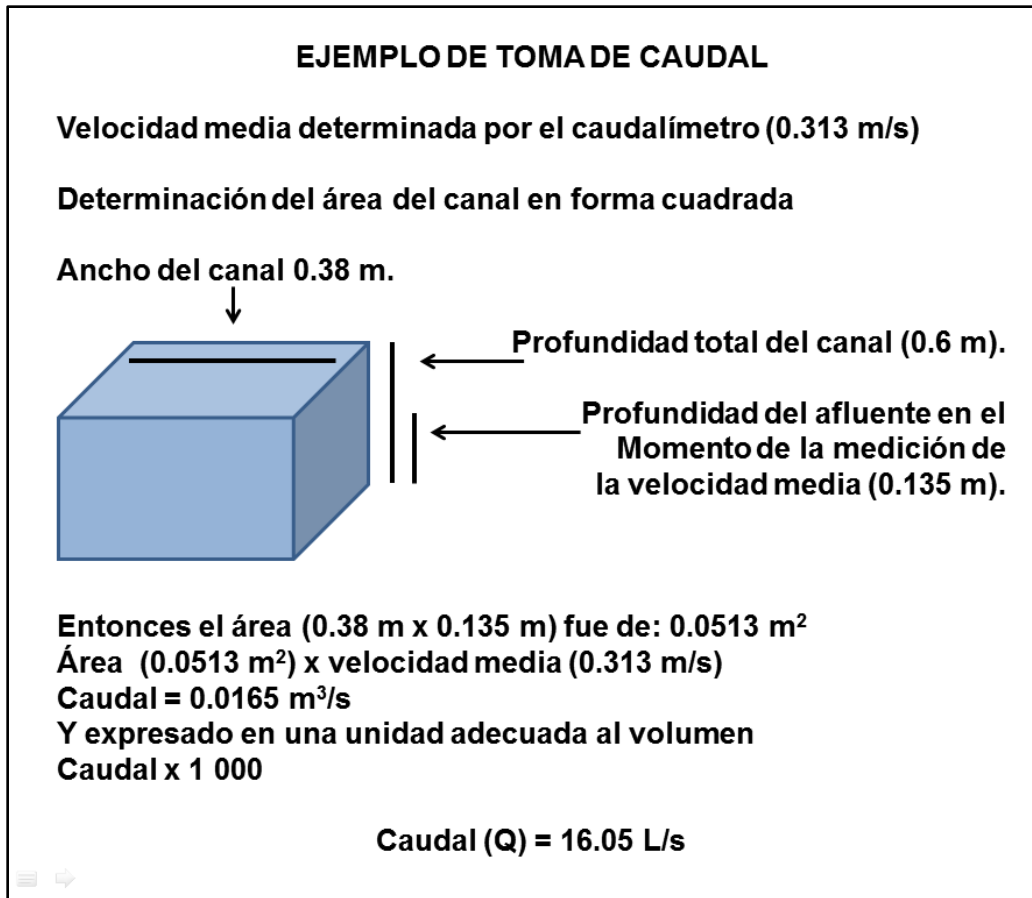
- El lugar seleccionado de la planta de tratamiento para la medición del caudal del afluente fue después del canal desarenador ya que el flujo de agua en ese punto fue uniforme.
- Con base en lo anterior, se utilizó el caudalímetro HACH FH 950 que midió la velocidad media del flujo de agua mediante un sensor que envió la información a un panel portátil (figura 8).
- Como se muestra en la figura 8, para calcular el área del canal se midió con una cinta métrica el ancho del canal (el cual no cambia) y con la varilla del caudalímetro (marcada con escala métrica) se determinó el nivel de agua, o la profundidad, que llevaba el canal en ese momento exacto.
- Las 10 repeticiones y el detalle de las mediciones se describen en la tabla VI.
- Lo descrito anteriormente se explica con el siguiente ejemplo de toma de caudal, como lo indica la figura 9.

Figura 8. Descripción del caudalímetro y toma de caudal en la planta de tratamiento de tipo biológica secundaria Santa Isabel II



Fuente: elaboración propia. Planta de tratamiento Santa Isabel II.

Figura 9. Metodología de toma de caudal en la planta de tratamiento



Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de AMSA (2019). *Manual de sistemas de análisis y procedimientos operativos para el monitoreo de plantas de tratamiento de AMSA.*

Tabla VI. Fase previa 10 repeticiones para la caracterización del caudal del afluente de la planta de tratamiento Santa Isabel II

Fecha	Hora	Velocidad media (m/s)	Ancho canal (m)	Profundidad del afluente (m)	Área ^a (m ²)	Caudal ^b Q (m ³ /s)	Caudal ^c Q (L/s)
14/03/19	10:40	0.313	0.38	0.135	0.0513	0.01605	16.05
15/03/19	10:20	0.316		0.130	0.0494	0.01561	15.61
19/03/19	10:45	0.283		0.118	0.0448	0.01269	12.69
21/03/19	10:40	0.335		0.160	0.0608	0.02037	20.37
22/03/19	13:38	0.331		0.140	0.0532	0.01761	17.61
27/03/19	15:20	0.332		0.138	0.0524	0.01741	17.41
29/03/19	15:21	0.294		0.092	0.0349	0.01028	10.28
02/04/19	15:23	0.304		0.138	0.0524	0.01594	15.94
04/04/19	15:19	0.325		0.140	0.0532	0.01729	17.29
05/04/19	15:34	0.257		0.112	0.0425	0.01094	10.94

Explicación de cálculos. Multiplicación del ancho del canal por la profundidad del afluente. **b.** Multiplicación del área por la velocidad media. **c.** multiplicación de caudal (Q) (m³/s) por 1 000, como una medida adecuada al volumen manejado por la planta.

Fuente: elaboración propia, según datos experimentales.

Figura 10. Toma de parámetros *in situ* en la planta de tratamiento de tipo biológica secundaria Santa Isabel II



Fuente: elaboración propia. Planta de tratamiento Santa Isabel II.

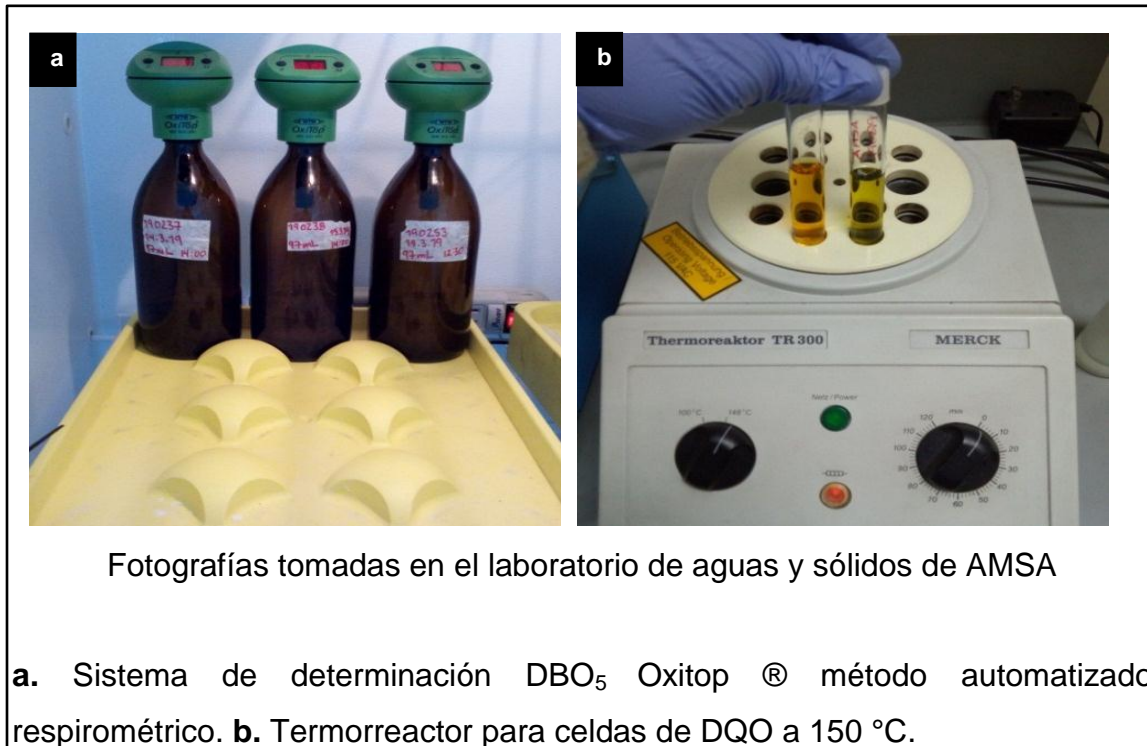
2.6. Ensayos en el laboratorio de aguas y sólidos de AMSA

Para evaluar la eficacia de los sistemas de tratamiento biológicos secundarios sobre la remoción de los contaminantes que arrastre el agua y de otros factores, se utilizaron ensayos a escala laboratorio, y en concreto, parámetros fisicoquímicos y biológicos de calidad del agua indicados por el Acuerdo Gubernativo número 236-2006.

2.6.1. Determinación de demanda química y demanda bioquímica de oxígeno

- La demanda química se realizó por medio de la metodología del *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 23rd. Edition*, sección 5210 D.
- Cada muestra se homogenizó y se tomó una alícuota de 2.5 mililitros con una pipeta automática y se agregó a una celda de reacción para DQO. Se dejó reaccionar en un termorreactor a 148 °C por dos horas (figura 11).
- Los tubos se enfriaron hasta alcanzar temperatura ambiente y se utilizó un espectro fotómetro Analytik Jena Specord 50 Plus a una longitud de onda de 600 nanómetros (nm) para reportar una medición en mg/L de oxígeno.
- La demanda bioquímica se realizó por medio de la metodología *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 23rd. Edition*, numeral 5220 D. Para la demanda bioquímica de oxígeno se colocó una alícuota de 97 mililitros (mL) en el sistema de medición Oxitop ® y se colocó a temperatura controlada en una incubadora a 20 °C por 5 días. El resultado se expresó en mg/L de oxígeno.

Figura 11. **Determinación de la demanda química y demanda bioquímica de oxígeno del afluente de la planta de tratamiento**



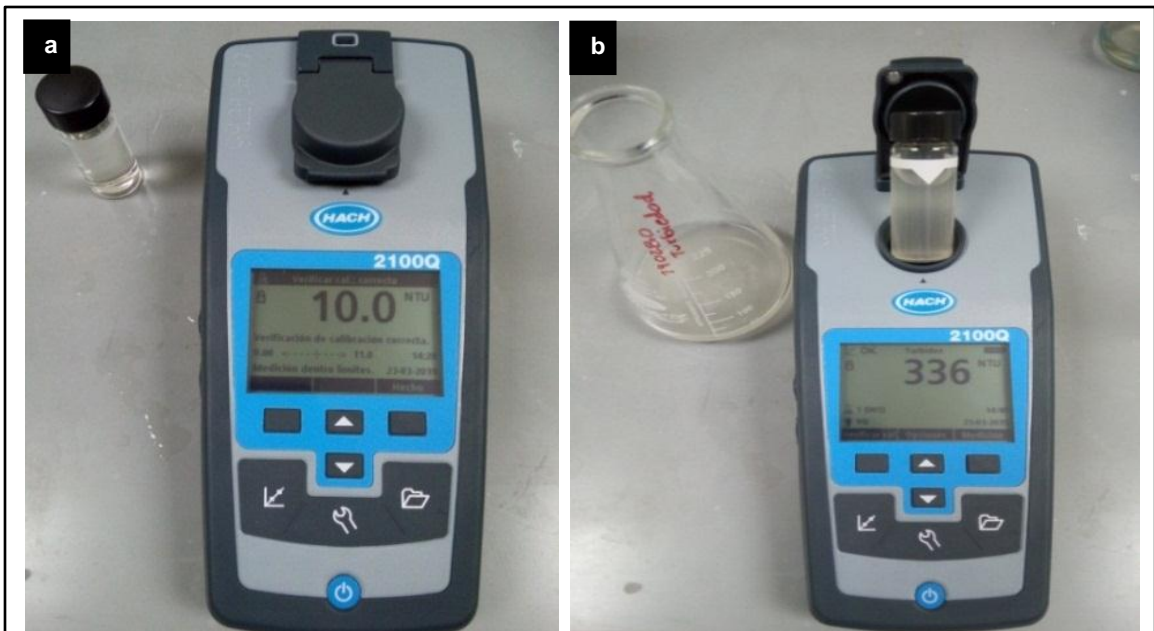
Fuente: elaboración propia. Laboratorio de aguas y sólidos AMSA.

2.6.2. Determinación de la turbiedad

- La determinación de la turbiedad se realizó por medio de la metodología del *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 23rd. Edition*, sección 2130 B.
- Cada muestra del afluente se homogenizó y se tomó una alícuota de 15 mililitros en una probeta y se colocó en un recipiente específico del equipo para medición (figura 12).

- Se introdujo al equipo turbidímetro HACH 2100 Q y se anotó la medición en unidades *Nephelometric Turbidity Unit (NTU)*, por sus siglas en inglés.

Figura 12. **Determinación de la turbiedad del afluente de la planta de tratamiento Santa Isabel II**



Fotografías tomadas en el laboratorio de aguas y sólidos de AMSA

a. Punto de control del equipo 10 NTU del turbidímetro portátil HACH 2100Q. **b.** Turbiedad de la muestra 190280, afluente de la planta de tratamiento Santa Isabel II.

Fuente: elaboración propia. Laboratorio de aguas y sólidos AMSA.

2.6.3. Caracterización de sólidos

Eliminar los sólidos es uno de los objetivos principales de la planta de tratamiento. Al conjunto de todos los sólidos se les denomina sólidos totales y pueden clasificarse a su vez según diversos criterios. Para este estudio se dividieron en: sólidos totales en suspensión, sólidos sedimentables, sólidos disueltos totales y sólidos totales.

Para llevar a cabo lo anteriormente descrito, las muestras se analizaron mediante las metodologías del *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 23rd. Edition*.

2.6.3.1. Sólidos sedimentables

- La determinación de los sólidos sedimentables se realizó por medio de la metodología del *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 23rd. Edition*, sección 2540 F.
- Cada muestra del afluente se homogenizó y se colocó 1 litro en un cono Imhoff y se dejó sedimentar durante 45 minutos.
- Posteriormente se rasparon las paredes internas del cono (en forma circular) con una varilla de agitación y se dejó sedimentar por 15 minutos más.
- Se reportó en dato en mL/L en una hora de sedimentación. El resultado significa el espacio en mL que ocupan los sólidos o la cantidad de agua que desplazan en mL en un litro de muestra (figura 13).

Figura 13. **Determinación de sólidos sedimentables del afluente y efluentes de la planta de tratamiento Santa Isabel II**



Fotografía tomada en el laboratorio de aguas y sólidos de AMSA

De izquierda a derecha: efluente 1, efluente 2, afluente PTAR Santa Isabel II
ID de muestras AMSA 190278-190280

Fuente: elaboración propia. Laboratorio de aguas y sólidos AMSA.

2.6.3.2. Sólidos disueltos totales

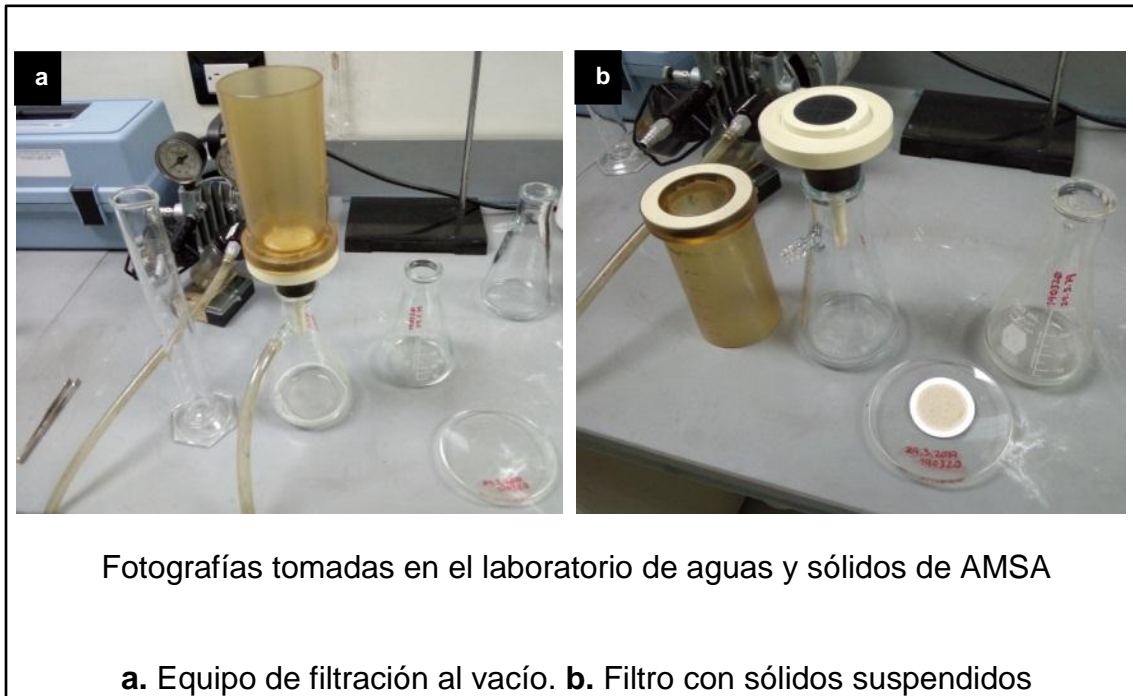
- La determinación de los sólidos suspendidos totales se realizó por medio de la metodología del *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 23rd. Edition*, sección 2510 B.

- En la muestra de la entrada de la planta de tratamiento se insertó la sonda del conductímetro WTW Cond 3210. Posteriormente se procedió a esperar que estabilizara la lectura y se anotó el valor en mg/L.

2.6.3.3. Sólidos suspendidos totales

- La determinación de los sólidos suspendidos totales se realizó por medio de la metodología del *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 23rd. Edition*, sección 2540 B.
- Se pesaron filtros Whatman 934 AH de 47 milímetros de diámetro libres de humedad en una balanza analítica de 4 decimales y se anotó el peso como peso inicial en miligramos.
- Se colocaron 40 mililitros en una probeta graduada y en un sistema de filtración se hizo pasar la muestra por el filtro el cual retuvo sólidos (figura 14).
- Los filtros húmedos se colocaron un horno de 103 a 105 °C por una hora y se almacenaron hasta que alcanzaron temperatura ambiente.
- Se pesaron los filtros libres de humedad en una balanza analítica de 4 decimales y se anotó el peso como peso final en miligramos.
- Se utilizó la siguiente fórmula: $SST\ mg/L = [(A-B) \times 1\ 000] / V$.
- Donde A es el peso del filtro seco con el sólido expresado en mg, B es el peso inicial del filtro expresado en mg y V es el volumen de la muestra en mL.

Figura 14. **Determinación de sólidos suspendidos totales del afluente de la planta de tratamiento Santa Isabel II**



Fuente: elaboración propia. Laboratorio de aguas y sólidos AMSA.

2.6.3.4. Sólidos totales

- La determinación de los sólidos totales se realizó por medio de la metodología del *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 23rd. Edition*, sección 2540 B.
- Para esta prueba se utilizaron crisoles de porcelana los cuales se desecaron de 103 a 105 °C por una hora y se colocaron en una desecadora hasta que alcanzaron temperatura ambiente.

- Después se pesaron los crisoles libres de humedad en una balanza analítica Sartorius CP 244 S de 4 decimales y se anotó el peso expresado como peso inicial en miligramos.
- A cada muestra del afluente se homogenizo y se colocaron 100 mililitros en una probeta graduada. Posteriormente, se colocaron en una plancha de calentamiento a 80 °C para la evaporación del agua, hasta alcanzar deshidratación total de la muestra.
- Las porcelanas desecadas se colocaron un horno de 103 a 105 °C, por una hora y luego en una desecadora hasta que alcanzaron temperatura ambiente.
- Posteriormente, se pesaron las porcelanas libres de humedad en una balanza analítica de Sartorius CP 244 S de 4 decimales y se anotó el peso expresado como peso final en miligramos.
- Se utilizó la siguiente fórmula para la determinación de los sólidos totales:

$$ST \text{ mg/L} = [(A-B) \times 1\,000] / V.$$
- Donde A es el peso del crisol seco con el sólido expresado en mg, B es el peso inicial del crisol expresado en mg y V es el volumen de la muestra utilizado en mL.

2.7. Elaboración de curvas de dosificación para el uso óptimo de floculantes

Las especificaciones seleccionadas para realizar las curvas de dosificación fueron las siguientes:

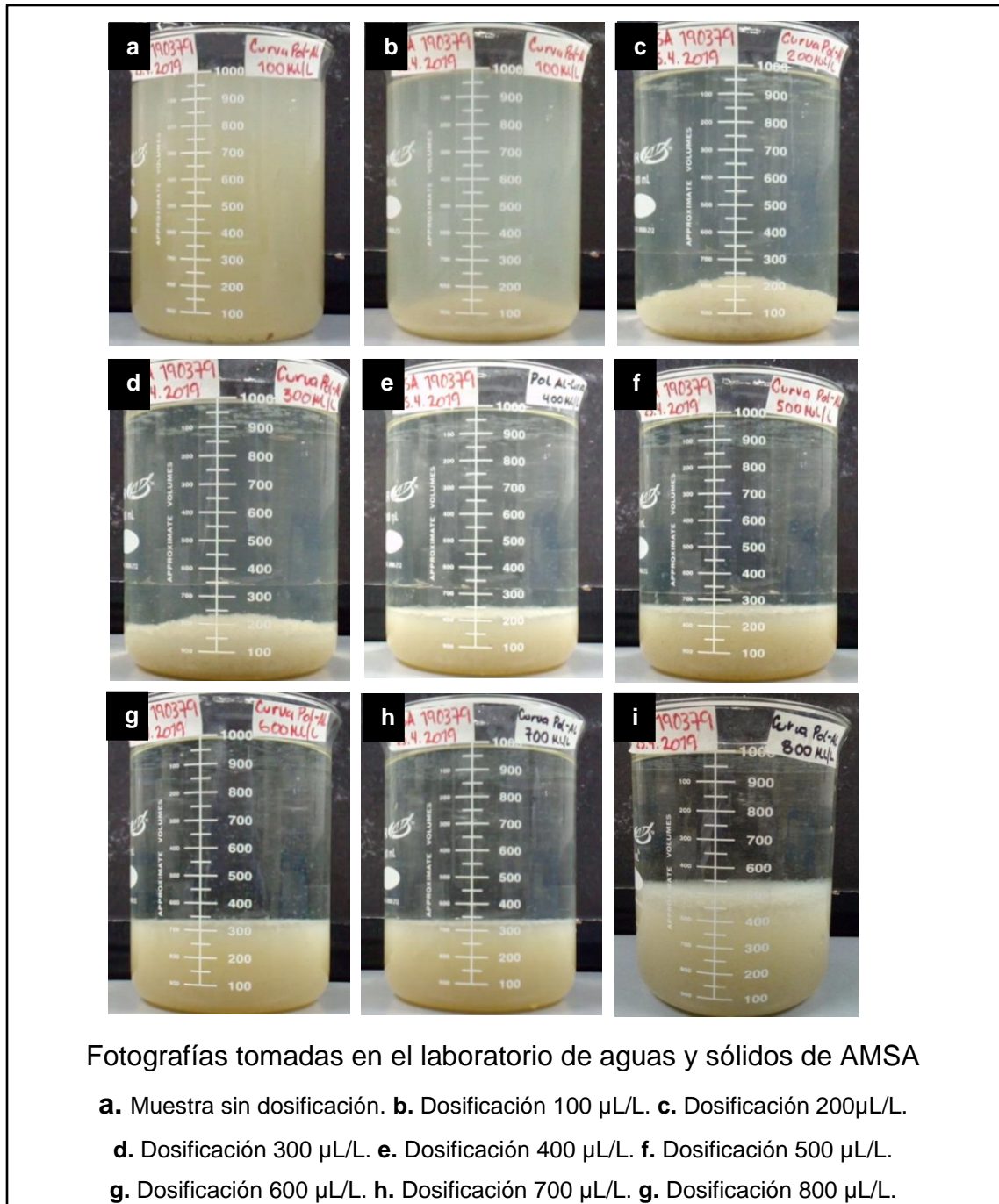
- Aplicada para el afluente de la planta de tratamiento. Cada punto de dosificación utilizó 1 litro del agua residual afluente.
- No se modificó el pH de la muestra recolectada del afluente y se utilizó la misma muestra. Se recolectaron y homogenizaron 25 litros del afluente.
- Se utilizó una curva de 8 puntos de dosificación y los puntos de dosificación se incrementaron cada 100 microlitros (μL) (tabla VII).
- Se utilizó una agitación mecánica de 20 RPM (revoluciones por minuto), y se dejó estabilizar. El tiempo de acción de la dosis ($\mu\text{L/L}$), fue de 7 minutos.
- Los puntos anteriormente descritos aplicaron para la evaluación de ambos productos floculantes.

Tabla VII. **Curva de dosificación diseñada para el agente Clear Aqua y Ecoclean 2300**

Punto de la curva	Dosis $\mu\text{L/L}$
1	100
2	200
3	300
4	400
5	500
6	600
7	700
8	800

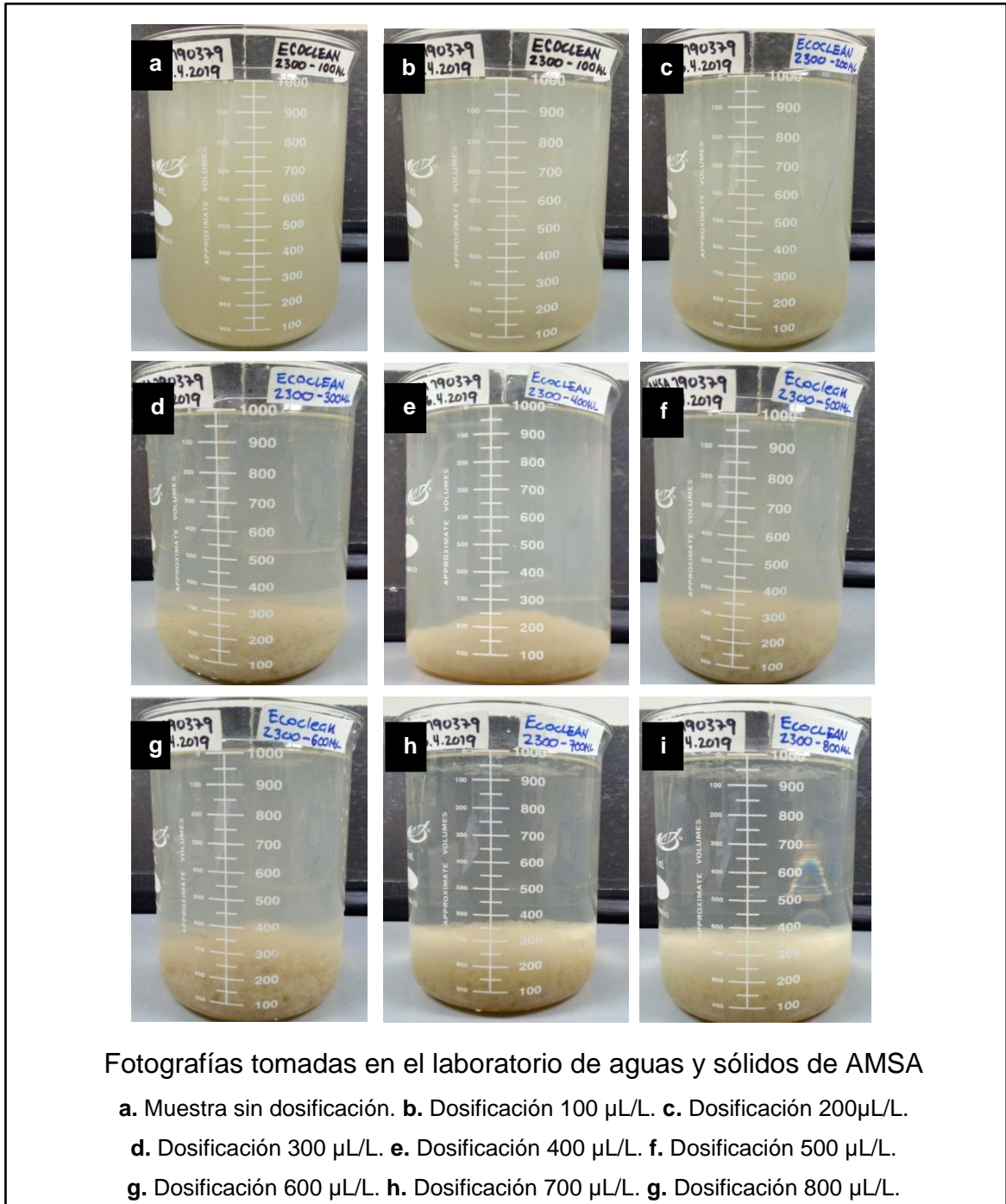
Fuente: elaboración propia según datos experimentales.

Figura 15. Curva de dosificación con el agente inorgánico Clear Aqua



Fuente: elaboración propia. Laboratorio de aguas y sólidos AMSA.

Figura 16. Curva de dosificación con el agente orgánico Ecoclean 2300



Fuente: elaboración propia. Laboratorio de aguas y sólidos AMSA.

2.8. Efecto de la dosificación sobre parámetros de interés

El uso de agentes floculantes de origen natural y sintético está ampliamente utilizado en las plantas de tratamiento de aguas residuales y aunque actúan sobre diversos parámetros de calidad del agua, los más importantes para esta investigación fueron: la turbiedad, el color aparente y los sólidos totales en suspensión.

2.8.1. La dosificación y el efecto sobre la turbiedad

La prueba de la turbiedad se realizó por medio de la metodología *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 23rd. Edition*, sección 2130 B.

Tabla VIII. Efecto de la dosificación sobre la turbiedad de las muestras obtenidas con los floculantes

Dosis $\mu\text{L/L}$	Efecto de Clear Aqua Turbiedad (NTU)	Efecto de Ecoclean 2300 Turbiedad (NTU)
0	310	310
100	64	104
200	15	85
300	11	36
400	6	40
500	3	15
600	4	17
700	4	17
800	3	16

Fuente: elaboración propia según datos experimentales.

- Con la tabla VIII se procedió a realizar el modelo estadístico de regresión lineal en el programa Excel, el cual se presenta de la siguiente manera para la turbiedad.
- Modelo estadístico de regresión lineal para el efecto del agente Clear Aqua sobre la turbiedad.

$$y = - 0.2397 x + 142.53 \text{ con un } R^2 = 0.4253.$$

- Modelo estadístico de regresión lineal para el efecto del agente Ecoclean 2300 sobre la turbiedad.

$$y = - 0.2657 x + 177.38 \text{ con un } R^2 = 0.5834.$$

2.8.2. La dosificación y el efecto sobre el parámetro color aparente

- La prueba del color aparente se realizó por medio de la metodología *Standard Methods for the Examination of Waterd and Wastewater 23rd. Edition*, sección 5120 D.
- Completada la fase sólida/líquida se separó el líquido resultante de la acción del floculante en un recipiente limpio para realizar la determinación de las pruebas de interés.
- Se homogenizó cada muestra de manera vigorosa y se tomó una alícuota de cada punto de la dosificación del agua tratada con los floculantes y se trasvasó a un tubo medidor de color aparente específico para el equipo colorímetro HACH DR 900 ®.

- Se limpió el tubo medidor con un papel limpia lente especial para retirar cualquier interferente presente. Se seleccionó el método en el equipo (color a 420 nm) y se anotó en la base de datos.

Tabla IX. **Efecto de la dosificación sobre el color aparente de las muestras obtenidas con los floculantes**

Dosis $\mu\text{L/L}$	Efecto de Clear Aqua CA (Pt/Co)	Efecto de Ecoclean 2300 CA (Pt/Co)
0	2 250	2 250
100	843	1 244
200	204	1 017
300	157	492
400	92	500
500	70	188
600	71	190
700	74	194
800	69	180

Fuente: elaboración propia según datos experimentales.

- Con la tabla IX se procedió a realizar el modelo estadístico de regresión lineal en el programa Excel, el cual se presenta de la siguiente manera para el color aparente.
- Modelo estadístico de regresión lineal para el efecto del agente Clear Aqua sobre el color aparente.

$$y = - 1.8973 x + 1184.5 \text{ con un } R^2 = 0.5096.$$

- Modelo estadístico de regresión lineal para el efecto del agente Ecoclean 2300 sobre el color aparente.

$$y = - 2.2313 x + 1587.5 \text{ con un } R^2 = 0.76.$$

2.8.3. La dosificación y el efecto sobre los sólidos suspendidos totales

La determinación de los sólidos suspendidos totales se realizó por medio de la metodología del *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 23rd. Edition*, sección 2540 B.

Tabla X. **Efecto de la dosificación sobre los sólidos suspendidos totales de las muestras obtenidas con los floculantes**

Dosis $\mu\text{L/L}$	Efecto de Clear Aqua (SST mg/L)	Efecto de Ecoclean 2300 (SST mg/L)
0	160	160
100	94	100
200	51	81
300	37	53
400	21	46
500	19	29
600	21	30
700	19	33
800	25	35

Fuente: elaboración propia según datos experimentales.

- Con la tabla X se procedió a realizar el modelo estadístico de regresión lineal en el programa Excel, el cual se presenta de la siguiente manera para los sólidos suspendidos totales.

- Modelo estadístico de regresión lineal para el efecto del agente Clear Aqua sobre los sólidos suspendidos totales.

$$y = - 0.1405 x + 105.87 \text{ con un } R^2 = 0.6425.$$

- Modelo estadístico de regresión lineal para el efecto del agente Ecoclean 2300 sobre los sólidos suspendidos totales.

$$y = - 0.1378 x + 118.13 \text{ con un } R^2 = 0.7392.$$

Figura 17. **Elaboración de las curvas de dosificación y su efecto en los sólidos suspendidos, color aparente y turbiedad**



Fuente: elaboración propia. Laboratorio de aguas y sólidos AMSA.

2.9. Obtención de lodos

En este apartado se realizó la recolección de lodos generados por la planta de tratamiento y que son depositados en el patio de secado de lodos. En el laboratorio se obtuvieron los lodos generados por los dos agentes floculantes.

2.9.1. Obtención de lodos generados por en funcionamiento de la planta Santa Isabel II

Los lodos generados por la planta Santa Isabel II se obtuvieron del patio de secado de lodos en un estado deshidratado al ambiente. (40 °C de sensación térmica cuando estuvo expuesto a los rayos solares y una humedad relativa de 50 %). Lo anterior se puede observar en la figura 18.

Se registró que a un caudal promedio del afluente de 15 L/s se pueden producir anualmente hasta 66 982 kg de lodos secos al ambiente, según el informe de ECOPLAN Consultores y Asociados (AMSA, 2001).

Figura 18. **Patio de secado y lodos para su disposición final de la planta Santa Isabel II**



Fuente: elaboración propia. Planta de tratamiento Santa Isabel II.

2.9.2. Obtención de lodos con los agentes floculantes secados en horno y al ambiente

- Para la obtención de lodos con los agentes floculantes se utilizó la dosis óptima según el mejor efecto de la dosificación sobre la turbiedad, 200 $\mu\text{L/L}$ de agente Clear Aqua y 400 $\mu\text{L/L}$ de agente Ecoclean 2300.

- Para obtener sólidos deshidratados se precipitó 1 litro de muestra del afluente donde se obtuvo una cantidad de litros de lodos, expresado en volumen/volumen (v/v).
- Para obtener lodos secos por medio de un horno, primero se secó la cantidad de lodos obtenidos en un horno a 80 °C por 12 horas. Posteriormente, el sólido se colocó a 105 °C por 1 hora para obtener sólidos con peso constante y un ambiente de 10 % de humedad relativa.
- Para obtener lodos secos por medio del ambiente (40 °C a 50 % de humedad relativa), se colocaron los lodos expuestos al ambiente (luz solar y al viento), por 7 días.
- El caudal promedio del afluente de la planta fue de 15 L/s. Si este caudal es constante, la planta puede tratar 1 296 000 litros de agua residual por día.
- Posteriormente estos litros de agua residual se multiplicaron por los gramos provenientes de 1 litro de agua residual tratada. Para obtener los gramos de lodos deshidratados ya sea secado en horno o secados al ambiente.
- Estos gramos se pueden expresar en kilogramos. La biomasa estimada se reportó como kg / día / tratamiento de sólidos en horno o al ambiente.
- Los sólidos obtenidos son la proyección que se puede obtener por día o lote de trabajo.

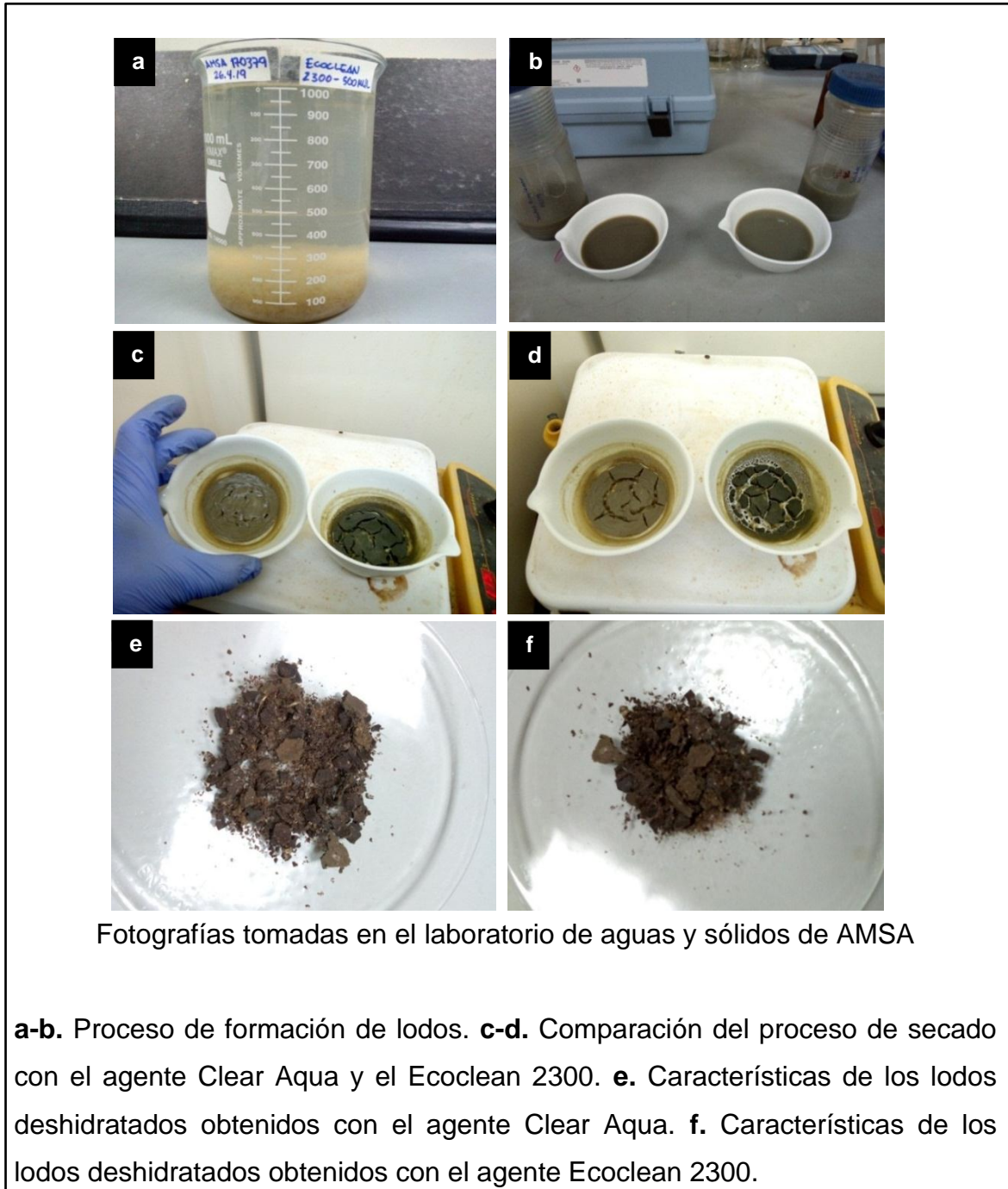
Tabla XI. Cálculos necesarios para obtener kg de sólidos por día secados con horno y al ambiente

Tratamiento en 1 L de agua ^a	Lodos obtenidos (L) ^b	Sólidos obtenidos (g) ^c	Volumen tratado por día (L) ^d	g de sólidos ^e /día/ tratamiento	kg de sólidos ^f /día/ tratamiento
PTAR	0.050	0.2360		305 856	306
Ecoclean 2300 + secado ambiente ^g	0.060	0.4900		635 040	635
Ecoclean 2300 + secado en horno ^h	0.060	0.3375	1 296 000 litros	437 400	437
Polímero aluminio + secado ambiente	0.055	0.5260		681 696	682
Polímero aluminio + secado en horno	0.055	0.4200		544 320	544

a. Combinación de tratamientos para obtención de lodos. Realizado en un litro de agua residual. **b.** Lodos obtenidos/litro de muestra. Relación volumen/volumen (v/v). **c.** Sólidos obtenidos de los lodos secados del numeral b. **d.** Volumen de agua tratado por día (litros). **e.** Multiplicación del numeral c y d. **f.** División del numeral e entre 1 000. **g.** Secado al ambiente: a 40 °C de sensación térmica cuando se expone a los rayos solares y un 50 % de humedad relativa. **h.** Secado en horno: secado en horno a 80 °C por 12 horas y luego a 105 °C por una hora con un 10 % de humedad relativa.

Fuente: elaboración propia.

Figura 19. **Proceso de obtención y secado de lodos**



Fuente: elaboración propia. Laboratorio de aguas y sólidos AMSA.

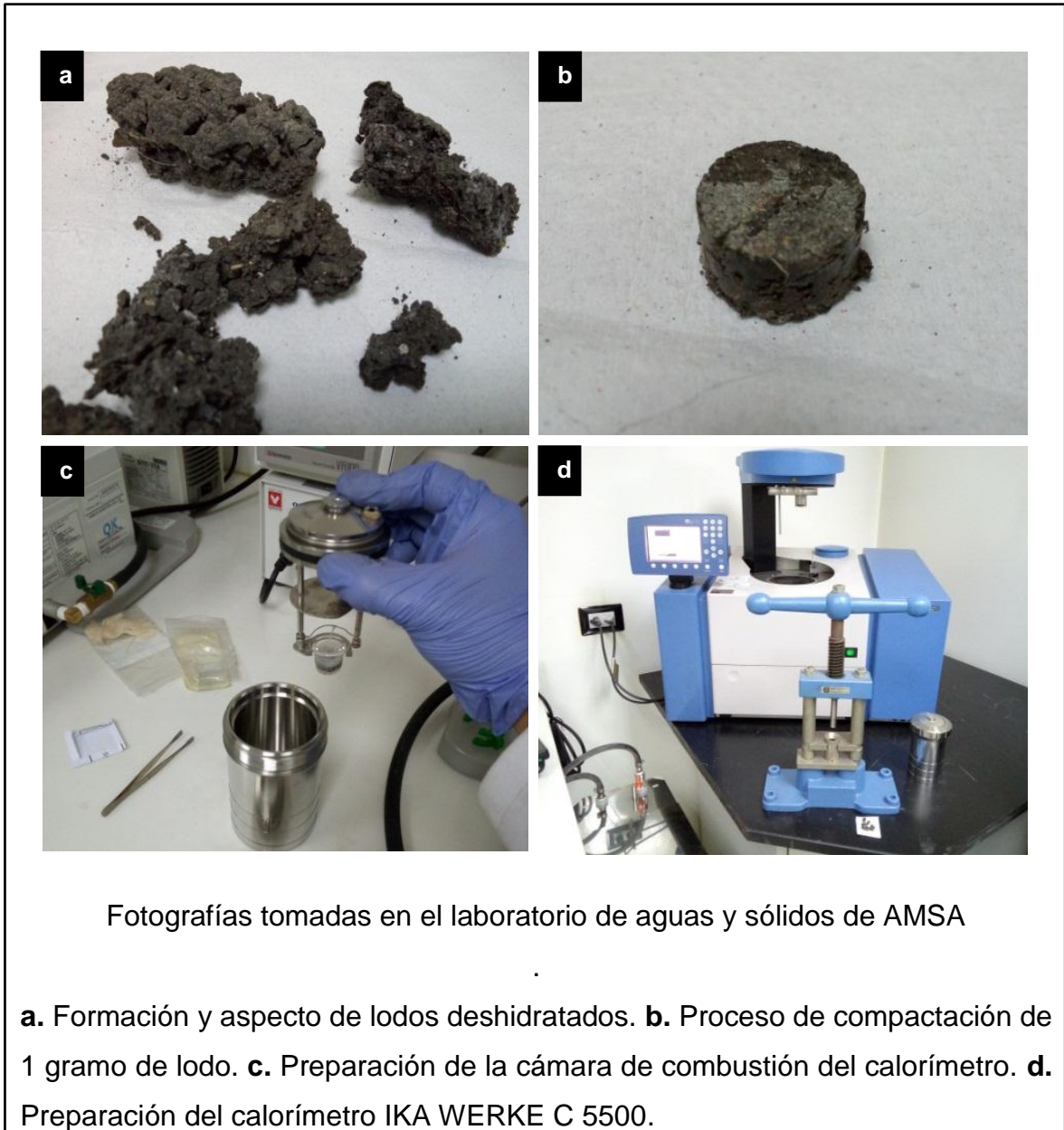
2.10. Determinación del poder calorífico de los biosólidos y el análisis de sus residuos

La determinación del poder calorífico se realizó de forma analítica (método práctico), mediante el uso de un calorímetro que determinó de forma directa en condiciones de laboratorio el poder calorífico de los combustibles.

2.10.1. Análisis del poder calorífico de los diferentes sólidos deshidratados

- Los sólidos deshidratados utilizados para este análisis fueron los procedentes de las metodologías descritas en la sección 2.9.2, sobre secado de lodos.
- Para determinar el poder calorífico se pesó lo más cercano posible a 1.0 gramo de los lodos generados deshidratados en una balanza analítica Sartorius CP 244 S de cuatro decimales (figura 20).
- Posteriormente se procedió a compactar el gramo de lodo deshidratado en una prensa manual de tornillo exclusiva para el análisis de poder calorífico para generar una pastilla adecuada para el sistema de combustión del calorímetro (figura 20).
- Se preparó la cámara de combustión del equipo calorímetro IKA WERKE C 5500 ® donde se colocó el gramo de sólido. Se procedió a la medición calorimétrica de lodos y el resultado se expresó en MJ/kg de sólido (figura 20).

Figura 20. **Proceso de la determinación del poder calorífico de los sólidos**



Fuente: elaboración propia. Laboratorio de aguas y sólidos AMSA.

Tabla XII. **Determinación del poder calorífico de lodos generados por medio de la planta Santa Isabel II y agentes flocculantes**

Generación de lodos		PCI lodos MJ/kg	PCS lodos MJ/kg
Secados en horno ^a	Agente Ecoclean 2300		15.11
	Agente Clear Aqua		16.60
	Generados por la planta Lodos digeridos		14.50
Secados al ambiente ^b	Agente Ecoclean 2300	14.72	
	Agente Clear Aqua	12.94	
	Generados por la planta Lodos digeridos	13.44	

a. Horno: 105 °C a 10 % de humedad relativa. **b.** Ambiente: 40 °C cuando se expuso a rayos solares y 50 % de humedad relativa. Abreviaturas. (PCI) poder calorífico inferior, (PCS) poder calorífico superior, (MJ/kg) Mega Julio/kilogramo.

Fuente: elaboración propia según datos experimentales.

2.10.2. Contenido de los residuos generados por los lodos después de la combustión

- Los residuos se pesaron en una balanza analítica Sartorius CP 244 S de 4 decimales. El contenido de residuos se reportó en gramos con base húmeda.
- Posteriormente estos gramos se proyectaron a un kilogramo de residuo de combustión por kilogramos de lodo seco (tabla XIII y figura 21).

Tabla XIII. **Contenido de los residuos generados por los lodos después de la combustión en base húmeda**

Generación de lodos		kg de residuos por kg de lodo seco
Secados al horno	Agente Ecoclean 2300	0.3074
	Agente Clear Aqua	0.3521
	Lodos digeridos de la PTAR	0.3325
Secados al ambiente	Agente Ecoclean 2300	0.2963
	Agente Clear Aqua	0.3195
	Lodos digeridos de la PTAR	0.3225

Fuente: elaboración propia según datos experimentales.

Figura 21. **Características de los residuos después de la combustión**



Fuente: elaboración propia. Laboratorio de aguas y sólidos AMSA.

2.11. Inventario energético de lodos

El inventario de lodos se realizó a la planta de tratamiento Santa Isabel II por medio de los lodos que puede generar con base en la tecnología instalada (biológica secundaria). También se incluyó en este inventario a los lodos generados en condiciones de laboratorio por medio del uso de los agentes floculantes Ecoclean 2300 y Clear Aqua. Lo anterior se estimó por año y se determinó la cantidad de energía que podrían generar estos lodos deshidratados al ser incinerados.

Tabla XIV. **Estimación de la energía de lodos por medio del funcionamiento de la planta de tratamiento**

Estimación de energía kWh	
365 días = lotes por tratamiento	899 GJ/año
365 lotes X 306 kg de lodos secos obtenidos por lote tratado	Trabajo aportado por 365 días X 12 horas al día 4 380 horas de trabajo generado/año
111 690 kg de lodo secado al ambiente Lodo obtenido por el funcionamiento de la planta	900 GJ dividido 4 380 horas de trabajo generado/año 0.2055 GJ
Del lodo primario total obtenido se obtiene el 60 % como lodo digerido producto de la fermentación anaeróbica bacteriana	1 GJ genera 277.78 kWh 0.2055 GJ generará 57 kWh
67 014 kg de lodo digerido seco al ambiente Lodo obtenido por el funcionamiento de la planta	57 kW como potencia nominal de estos sólidos Multiplicado por la cantidad de horas por año (4 380 horas)
Lo anterior multiplicado por el poder calorífico de estos lodos (13.41 MJ/kg) 898 657 MJ / año Lo anterior dividido por 1000 se puede expresar en GJ 899 GJ/año	Energía proyectada anual 249 660 kWh

Fuente: elaboración propia según datos experimentales.

Tabla XV. **Estimación de la energía de lodos generados por medio del agente Clear Aqua secados en horno**

Estimación de energía kWh	
365 días = lotes por tratamiento	3 296 GJ/año
365 lotes X 544 kg/día de lodos secos obtenidos por lote tratado (calculados en la sección 2.9.2.)	Trabajo aportado por 365 días X 12 horas al día 4 380 horas de trabajo generado/año
198 560 kg de lodo seco al horno al utilizar el floculante polímeros con aluminio	2 396 GJ dividido 4 380 horas de trabajo generado/año 0.5470 GJ
Lo anterior multiplicado por el poder calorífico de estos lodos (16.6 MJ/kg)	1 GJ genera 277.78 kWh 0.5470 GJ generará 152 kWh
3 296 096 MJ / año	152 kW como potencia nominal de estos sólidos
Lo anterior dividido por 1000 se puede expresar en GJ	Multiplicado por la cantidad de horas por año (4 380 horas)
3 296 GJ/año	Energía proyectada anual 665 760 kWh

Fuente: elaboración propia según datos experimentales.

Tabla XVI. **Estimación de la energía de lodos generados por medio del agente Ecoclean 2300 secados en horno**

Estimación de energía kWh	
365 días = lotes por tratamiento	2 410 GJ/año
365 lotes X 437 kg/día de lodos secos obtenidos por lote tratado (calculados en la sección 2.9.2)	Trabajo aportado por 365 días X 12 horas al día 4 380 horas de trabajo generado/año
159 505 kg de lodo seco al horno al utilizar el floculante polímeros con aluminio	2 410 GJ dividido 4 380 horas de trabajo generado/año
	0.5500 GJ
Lo anterior multiplicado por el poder calorífico de estos lodos (15.11 MJ/kg)	1 GJ genera 277.78 kWh 0.5500 GJ generará 153 kWh
2 410 120 MJ / año	153 kW como potencia nominal de estos sólidos
Lo anterior dividido por 1000 se puede expresar en GJ	Multiplicado por la cantidad de horas por año (4 380 horas)
2 410 GJ/año	Energía proyectada anual 670 140 kWh

Fuente: elaboración propia según datos experimentales.

Tabla XVII. **Estimación de la energía de lodos generados por medio del agente Clear Aqua secados al ambiente**

Estimación de energía kWh	
365 días = lotes por tratamiento	3 221 GJ/año
365 lotes X 682 kg de lodos secos obtenidos por lote tratado (calculados en la sección 2.9.2)	Trabajo aportado por 365 días X 12 horas al día 4 380 horas de trabajo generado/año
248 930 kg de lodo seco al horno al utilizar el floculante polímeros con aluminio	3 221 GJ dividido 4,380 horas de trabajo generado/año 0.7354 GJ
Lo anterior multiplicado por el poder calorífico de estos lodos (12.94 MJ/kg)	1 GJ genera 277.78 kWh 0.7354 GJ/ generará 204 kWh
3 221 154 MJ / año	204 kW como potencia nominal de estos sólidos
Lo anterior dividido por 1000 se puede expresar en GJ	Multiplicado por la cantidad de horas por año (4 380 horas)
3 221 GJ/año	Energía proyectada anual 893 520 kWh

Fuente: elaboración propia según datos experimentales.

Tabla XVIII. **Estimación de la energía de lodos generados por medio del agente Ecoclean 2300 secados al ambiente**

Estimación de energía kWh	
365 días = lotes por tratamiento	3,412 GJ/año
365 lotes X 635 kg de lodos secos obtenidos por lote tratado (calculados en la sección 2.9.2)	Trabajo aportado por 365 días X 12 horas al día 4 380 horas de trabajo generado/año
231 775 kg de lodo seco al horno al utilizar el floculante polímeros con aluminio	3 412 GJ dividido 4.380 horas de trabajo generado/año
	0,7790 GJ
Lo anterior multiplicado por el poder calorífico de estos lodos (14.72 MJ/kg)	1 GJ genera 277.78 kWh 0.7790 GJ generará 216 kWh
3 411 728 MJ / año	
Lo anterior dividido por 1,000 se puede expresar en GJ	216 kW como potencia nominal de estos sólidos Multiplicado por la cantidad de horas por año (4 380 horas)
3 412 GJ/año	Energía proyectada anual 946 080 kWh

Fuente: elaboración propia según datos experimentales.

3. EFICACIA DEL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE TIPO ORDINARIO CUANDO SE UTILIZA EL AGENTE ECOCLEAN 2300 EN COMPARACIÓN CON EL AGENTE CLEAR AQUA CON ALUMINIO HIDROLIZADO

3.1. Fase de campo y recolección de las muestras

Se recolectó una muestra puntual del afluente para la evaluación de parámetros de interés antes y después de la aplicación del agente Ecoclean 2300 y el agente Clear Aqua.

Figura 22. **Recolección de muestras para la evaluación de la eficacia del tratamiento con agentes flocculantes**



Fuente: elaboración propia. Planta de tratamiento Santa Isabel II.

La eficacia del tratamiento con los floculantes Ecoclean 2300 y Clear Aqua se dividió en tres fases: 1) eficacia de la reducción de parámetros físicos, 2) la eficacia en relación con la disminución de nutrientes y 3) la eficacia en la reducción de la población bacteriana en general. Los anteriores parámetros se expresaron como indicadores de remoción en porcentaje.

3.2. Eficacia del tratamiento con agentes floculantes

- Completada la fase sólida/líquida se separó el líquido resultante de la acción del floculante en un recipiente limpio para realizar la determinación de las pruebas de interés.
- Las pruebas de los parámetros fisicoquímicos y nutrientes se realizaron por medio de la metodología *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 23rd. Edition*.
- En este estudio se evaluó la eficacia de únicamente la dosificación de agentes floculantes (orgánicos en comparación de inorgánicos) en muestras del afluente de la planta Santa Isabel II, para documentar si cumple o no con el Acuerdo Gubernativo número 236-2006.
- La evaluación de la eficacia se realizó por medio de una tabla comparativa para indicar el porcentaje de remoción de cada parámetro del afluente tratado con el agente Ecoclean 2300 y el afluente tratado con el agente Clear Aqua.
- Al final de la tabla se colocó el límite máximo permisible (LMP) del parámetro específico según la normativa local. El Acuerdo Gubernativo Número 236-2006.

Tabla XIX. **Ejemplo de la evaluación de parámetros al utilizar agentes floculantes en comparación con el funcionamiento de la planta**

Parámetros	Afluente sin tratamiento	Efluente con tratamiento convencional	Afluente Clear Aqua	Afluente Ecoclean 2300	Limite AG 236-2006
Fósforo total (mg/L)	9.8741	6.1237	0.3042	1.0057	5.0

Fuente: elaboración propia según datos experimentales.

Posteriormente, los resultados antes descritos se representaron en porcentaje de remoción por medio de la siguiente fórmula.

$$\% \text{ remoción} = \frac{[(\text{cantidad inicial} - \text{cantidad removida}) \times 100]}{\text{Cantidad inicial}}$$

Para lo cual se realizó el siguiente ejemplo:

$$\% \text{ remoción fósforo total con tratamiento convencional} = \frac{(9.8741 \text{ mg/L} - 6.1237 \text{ mg/L}) \times 100}{9.8741 \text{ mg/L}} = 38 \%$$

Tabla XX. **Ejemplo de la eficacia del tratamiento cuando se utilizan agentes floculantes en comparación con el funcionamiento de la planta**

Parámetros	% de remoción del tratamiento		
	Efluente sin tratamiento	Afluente con Clear Aqua	Afluente con Ecoclean 2300
Fósforo total	38	97	90

Fuente: elaboración propia según datos experimentales.

4. PROPUESTAS PARA ALTERNATIVAS DE MEJORA EN LOS PROCESOS DE GENERACIÓN DE LODOS Y DE LA CALIDAD DEL AGUA EN EL EFLUENTE DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUALES

4.1. Inversión económica de diversas tecnologías de tratamiento para aguas residuales de tipo ordinario

La inversión económica sobre plantas de tratamiento de agua residual se dividió en comparación en base a varias tecnologías: inversión inicial, costo de tratamiento por metro cúbico de agua tratada, costo de floculantes por metro cúbico de agua tratada con la planta de Santa Isabel II y costo de floculantes por metro cúbico de agua tratada con sistema de flotación por aire disuelto.

4.1.1. Comparación en inversión económica inicial

- Se realizó una proyección de la inversión económica inicial para la construcción de plantas de tratamiento de tipo biológico secundario prefabricadas y construidas en sitio en comparación con un sistema de decantación lamelar diseñado para funcionar con agentes floculantes.
- Para la planta de tratamiento de tipo biológico secundario se utilizaron los datos proporcionados por Rodas Ruíz (2003), quien realizó un presupuesto de área y volumen, donde describió el precio unitario de cada actividad por desarrollar durante la construcción de la planta.

- Para la planta de tratamiento prefabricada se utilizaron los datos proporcionados por Hernández Gramajo (2014), quien realizó un presupuesto de área y volumen, donde describió el precio unitario de cada actividad a desarrollar durante la construcción de la planta.
- Para el sistema de flotación por aire disuelto se utilizaron los datos proporcionados por *Toro Wastewater Equipment Industries* (2009), quienes presentan el servicio de sistemas de flotación por aire disuelto (SFAD) en base al caudal de diseño, así como contenedores especializados para secado de lodos.
- Los detalles de los volúmenes proyectados, los precios unitarios propuestos de cada obra realizada y el total se presentan en el apartado de los apéndices.

4.1.2. Comparación del costo de tratamiento del agua por metro cúbico

- Se realizó una proyección del costo del agua tratada por metro cúbico en plantas de tratamiento de tipo biológico secundario en comparación con un sistema flotación por aire disuelto (SFAD) donde se puedan aplicar agentes floculantes.
- La proyección del presupuesto fue integrada por todos los renglones que llevaron el proyecto para su realización.

- Para la proyección de las plantas de tratamiento (construidas en sitio y de módulos prefabricados) se utilizaron los datos proporcionados por Hernández Gramajo (2014), quien realizó un presupuesto de área y volumen, donde describió el precio unitario de cada actividad por desarrollar de operación y mantenimiento de la planta por mes.
- Los detalles de los volúmenes proyectados, los precios unitarios propuestos de operación, mantenimiento y el total se presentan en el apartado de apéndices.
- El mayor costo que representó el mantenimiento fue la utilización de agentes floculantes por eso se muestra, en detalle, el precio de los floculantes por metro cúbico de agua tratada.
- A continuación en la tabla XXI y XXII se presenta el costo de floculantes por metro cúbico de agua tratada utilizados en la planta de tratamiento de tipo biológico secundario Santa Isabel II.

Tabla XXI. **Costo de floculantes por metro cúbico de agua tratada con tecnología de la planta de tratamiento Santa Isabel II**

Agente Clear Aqua	Agente Ecoclean 2300
1 000 litros de agua por tratar X 0.0002 litros (200 µL) por litro del agente floculante	1 000 litros de agua por tratar X 0.0004 litros (400 µL) por litro del agente floculante
0.2 litros de agente Clear Aqua / 3.78 litros (1 galón)	0.4 litros de agente Clear Aqua / 3.78 litros (1 galón)
0.05291 galones por metro cúbico de agua tratada	0.1058 galones por metro cúbico de agua tratada
0.05291 galones X Q. 200 (precio del galón del floculante)	0.1058 galones X Q. 300 (precio del galón del floculante)
Q. 10.58 por metro cúbico de agua tratada	Q. 31.74 por metro cúbico de agua tratada
Presupuesto únicamente del agente floculante	Presupuesto únicamente del agente floculante
En el apartado de apéndices este resultado se integra a los demás renglones que forman parte del mantenimiento de la planta de tratamiento Santa Isabel II.	En el apartado de apéndices este resultado se integra a los demás renglones que forman parte del mantenimiento de la planta de tratamiento Santa Isabel II.

Fuente: elaboración propia según datos experimentales.

Tabla XXII. **Costo de floculantes por metro cúbico de agua tratada con tecnología de flotación por aire disuelto FAD**

Agente Clear Aqua	Agente Ecoclean 2300
1 000 litros de agua por tratar X 0.0001 litros (100 µL) por litro del agente floculante	1 000 litros de agua por tratar X 0.0001 litros (100 µL) por litro del agente floculante
0.1 litros de agente Clear Aqua / 3.78 litros (1 galón)	0.1 litros de agente Clear Aqua / 3.78 litros (1 galón)
0.02645 galones por metro cúbico de agua tratada	0.02645 galones por metro cúbico de agua tratada
0.02645 galones X Q. 200 (precio del galón del floculante)	0.02645 galones X Q. 300 (precio del galón del floculante)
Q. 5.29 por metro cúbico de agua tratada Presupuesto únicamente del agente floculante	Q. 7.93 por metro cúbico de agua tratada Presupuesto únicamente del agente floculante
En el apartado de apéndices este resultado se integra a los demás renglones que forman parte del mantenimiento del sistema de flotación por aire disuelto FAD.	En el apartado de apéndices este resultado se integra a los demás renglones que forman parte del mantenimiento del sistema de flotación por aire disuelto FAD.

Fuente: elaboración propia según datos experimentales.

4.2. Propuesta de tratamiento y valorización de los lodos y el agua tratada por floculación – coagulación

Se describió un sistema de economía circular propuesto por VAOLIA *Water Technologies* (2015), para una planta de tratamiento, que consistió en: describir el aporte económico de la materia prima para el balance energético local, y la economía, la cual se proyectó como la generación y venta de diversos materiales, así como de subproductos.

4.3. Propuesta de obtención y uso de materiales y subproductos

- Se realizó un esquema con la descripción del proceso de floculación para obtener la fase sólida/líquida según *VAOLIA Water Technologies* (2015).
- Se describió en la figura 28 los usos que se le pueden otorgar al agua tratada y sus tecnologías compatibles con el entorno local según *VAOLIA Water Technologies* (2015).

4.4. Propuesta de economía circular para la planta de tratamiento para aguas residuales de tipo ordinario

- Se realizó una proyección de los ingresos económicos para la planta de tratamiento Santa Isabel II, al promover dos grandes servicios:
- Venta de sólidos deshidratados: inventario energético anual y venta de los frutos: obtenidos anualmente de árboles utilizados como un sistema biológico de reutilización del agua en recuperación de nutrientes.

- Se describieron los ingresos económicos por año a la planta de tratamiento por la venta de los sólidos deshidratados al ambiente según su poder calorífico como se indica en la tabla XXIII.
- Los sólidos se cotizaron por medio de la similitud con el poder calorífico con carburantes sólidos utilizados en industrias. Se registró que el más utilizado es el carbón bituminoso que se cotiza a un promedio de Q. 1 000 la tonelada.

Tabla XXIII. **Ingresos anuales por venta de sólidos deshidratados al ambiente**

Sistema	Toneladas	Ingreso anual (Q).
PTAR Santa Isabel II	67	67 000
SFAD + Clear Aqua	232	232 000
SFAD + Ecoclean 2300	249	249 000

Fuente: elaboración propia.

- Se describieron los ingresos económicos directos a la planta de tratamiento por proyección de venta de los frutos de árboles (aguacate Hass), dentro de la planta de tratamiento como un sistema biológico de reutilización del agua en recuperación de nutrientes. El costo del aguacate Hass se cotizó en Q 2.00 la unidad como se detalla en la tabla XXIV.

Tabla XXIV. **Ingresos anuales por venta de aguacates al utilizar el agua tratada de los sistemas**

Sistema	Área (ha)	Plántulas	Promedio aguacates anual^a	Ingreso anual (Q).
Cultivo muy intensivo de 2.5 m x 2.5 m	0.5	800	250	400 000
	1	1 600	250	800 000
	1	1 600	250	800 000

a. Los aguacates se comercializan a Q 2.00 la unidad. Abreviaturas. (ha) hectáreas.

Fuente: elaboración propia.

5. RESULTADOS

En base a los objetivos desarrollados para esta investigación se estableció la caracterización del afluente en base al promedio de 10 repeticiones realizadas entre abril y mayo de 2019, como se observa en la tabla XXV. Las 10 repeticiones para la caracterización del afluente, con los indicadores fisicoquímicos de calidad del agua, se detallan en el apartado de apéndices.

Tabla XXV. **Estimación del caudal en el afluente de la planta de tratamiento Santa Isabel II**

Parámetro	Caudal Q (L/s)
Dato menor del afluente	10.93
Promedio del afluente (10 repeticiones)	15.42
Dato mayor del afluente	20.37
Desviación estándar	3.19

Fuente: elaboración propia según datos experimentales.

En la tabla XXVI se documentó el parámetro *in situ* pH, según el Acuerdo Gubernativo 236-2006, el cual estimó que el promedio de las 10 repeticiones para la caracterización del afluente, fue de 7.33. Sin embargo, las especificaciones de pH óptimo de acción de los fabricantes del agente Ecoclean 2300 y el agente Clear Aqua, se documentaron en 8.5 y 8.2, respectivamente. Las 10 repeticiones para la caracterización del afluente se detallan en el apartado de apéndices.

Tabla XXVI. **Caracterización del pH del Ecoclean 2300, polímero con aluminio y el afluente de la planta Santa Isabel II**

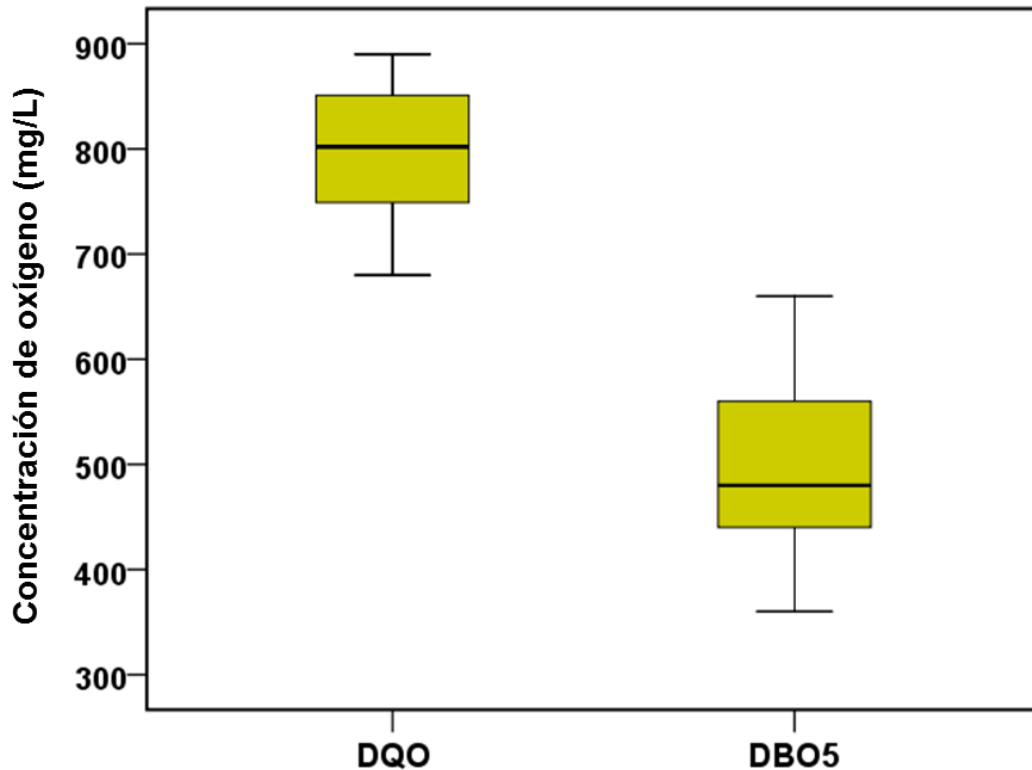
Fuente	Unidades de pH
Ecoclean 2300 (pH óptimo de acción)	8.5
Clear Aqua (pH óptimo de acción)	8.2
Dato menor del afluente	7.04
Promedio del afluente (10 repeticiones)	7.33
Dato mayor del afluente	7.57
Desviación estándar	0.15

Fuente: elaboración propia según datos experimentales.

También dentro de la fase previa de la caracterización del afluente de la planta de tratamiento Santa Isabel II, se documentó que el promedio de las 10 repeticiones del análisis de la demanda química de oxígeno (DQO) fue de 792 mg/L de O₂, con un dato menor que correspondió a 680 mg/L de O₂ y un dato máximo de 890 mg/L O₂, con una desviación estándar de 73 mg/L de O₂.

También se realizó el promedio para la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), el cual fue de 494 mg/L O₂, un dato menor que fue de 360 mg/L O₂ y un dato máximo que se registró en 660 mg/L O₂, así como una desviación estándar de 93 mg/L de O₂, como se observa en la figura 23. Las 10 repeticiones para la caracterización del afluente se detallan en el apartado de apéndices.

Figura 23. **Caracterización de la demanda química y demanda bioquímica de oxígeno en el afluente de la planta Santa Isabel**

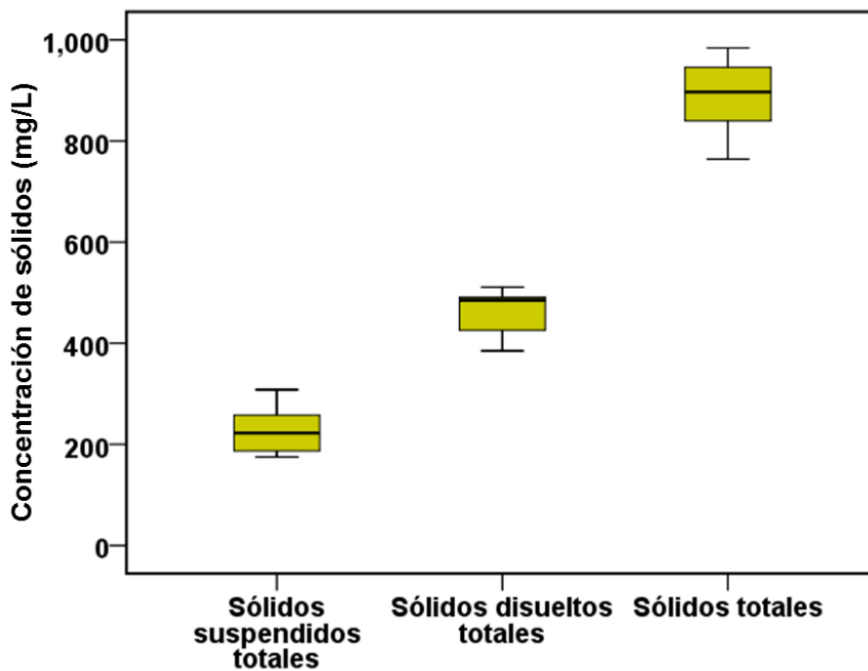


Fuente: elaboración propia según datos experimentales.

También este estudio se centró en la caracterización de parámetros físicos como los sólidos del afluente de la planta Santa Isabel II por medio de la determinación del perfil de sólidos. Con base en lo anterior, se realizó el promedio de las 10 repeticiones para los sólidos suspendidos totales, el cual fue de 227 mg/L y en los extremos con un dato mínimo de 175 mg/L y un máximo de 308 mg/L, así como una desviación estándar de 44 mg/L. Para los sólidos disueltos totales, el promedio fue de 461 mg/L y en los extremos con un dato mínimo de 385 mg/L y el dato máximo de 511 mg/L, así como una desviación estándar de 44 mg/L, como se observa en la figura 24.

Lo anteriormente descrito también se aplicó para los sólidos totales, donde el promedio de las 10 repeticiones fue de 887 mg/L, con el dato mínimo dentro de las repeticiones de 764 mg/L y el dato máximo de 984 mg/L, así como una desviación estándar de 75 mg/L, según la figura 24.

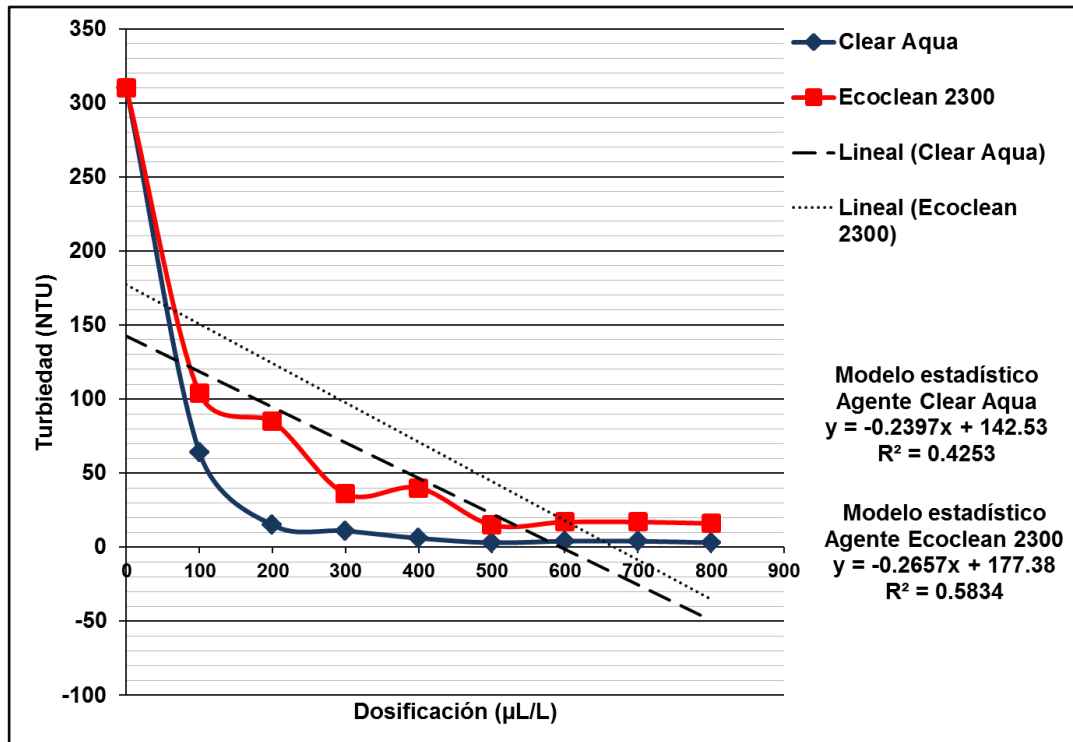
Figura 24. **Caracterización y perfil de sólidos en el afluente de la planta Santa Isabel II**



Fuente: elaboración propia según datos experimentales.

En la figura 25 se observa el efecto de la dosificación de los floculantes sobre la turbiedad. Se documentó una dosis óptima de 200 $\mu\text{L/L}$ para el agente inorgánico Clear Aqua y una dosis óptima de 500 $\mu\text{L/L}$ del agente orgánico Ecoclean 2300 al registrarse una turbiedad de 15 NTU en estos puntos de la curva. Después de las dosis indicadas se observa que las unidades de turbiedad se comportaron de manera similar sin presenciar mayores cambios.

Figura 25. Efecto de la dosificación de los floculantes en la turbiedad

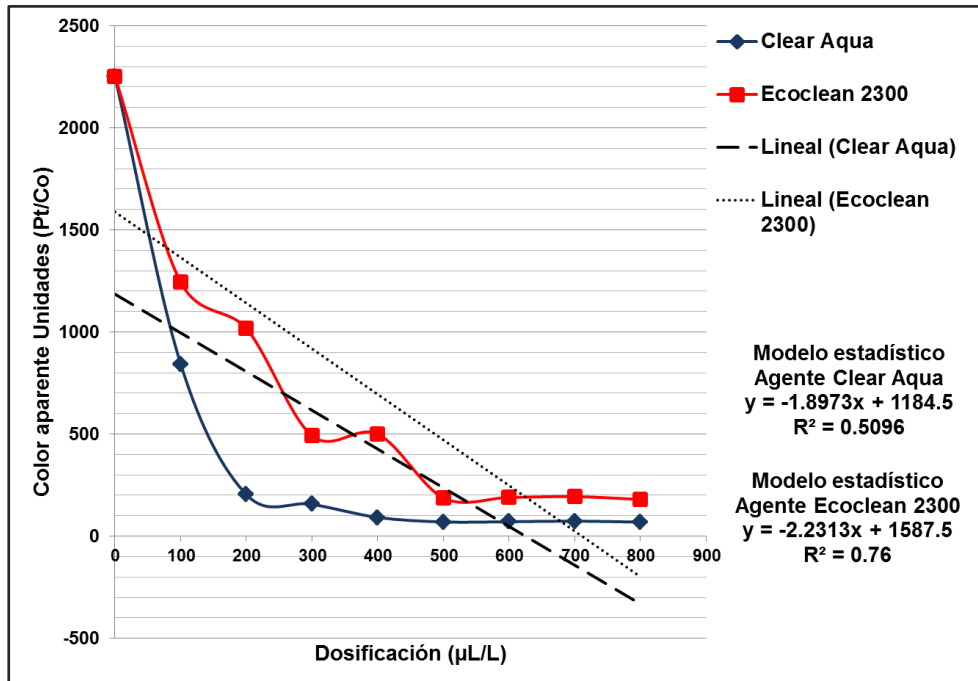


Fuente: elaboración propia según datos experimentales.

En la figura 26 se observa el efecto de la dosificación de los floculantes sobre el color aparente. Se documentó una dosis óptima de 500 µL/L para el agente inorgánico Clear Aqua que retira el 97 % del color aparente y establece un color de 70 unidades Pt/Co en el agua tratada. Se documentó una dosis óptima de 500 µL/L del agente orgánico Ecoclean 2300 que únicamente logra un 92 % de eficacia para llegar a un color de 188 unidades Pt/Co.

Después de las dosis anteriormente indicadas se observa que las unidades de color se comportaron de manera similar sin presenciar mayores cambios.

Figura 26. Efecto de la dosificación de los floculantes sobre el color aparente

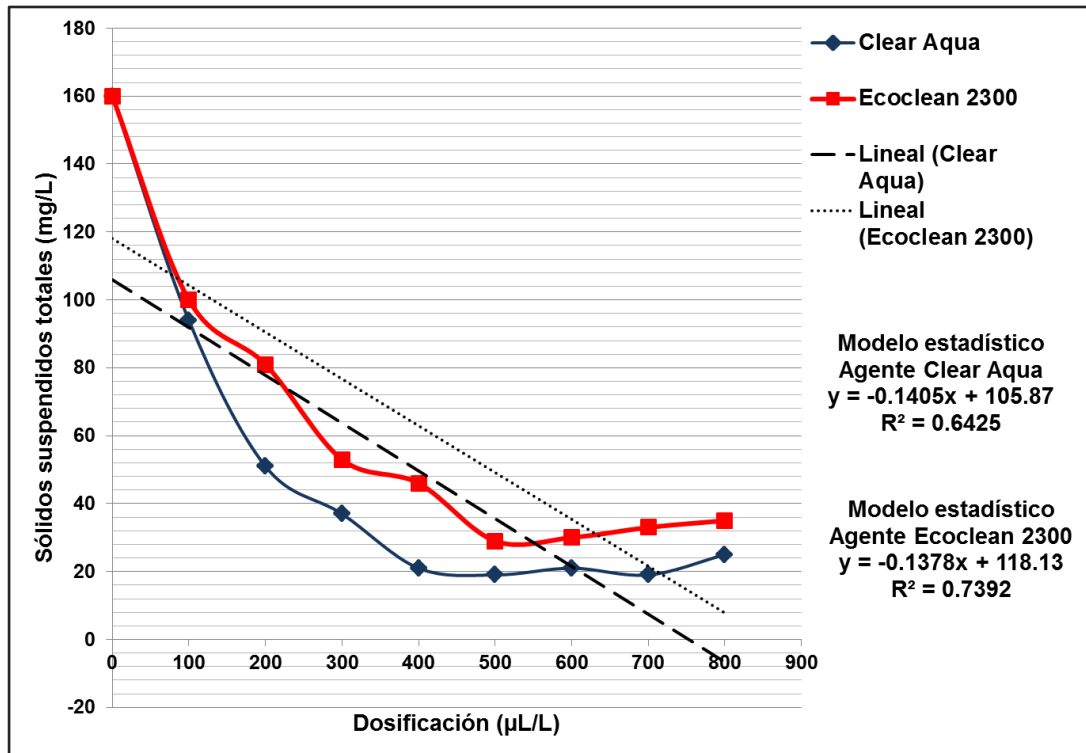


Fuente: elaboración propia según datos experimentales.

En la figura 27 se observa el efecto de la dosificación de los floculantes sobre los sólidos suspendidos totales. Se documentó una dosis óptima de 500 µL/L para el agente inorgánico Clear Aqua que retira el 87 % de los sólidos suspendidos totales y una concentración de 21 mg/L en el agua tratada.

Se documentó una dosis óptima de 500 µL/L del agente orgánico Ecoclean 2300 que únicamente logra un 82 % de eficacia para llegar a una concentración de 29 mg/L. Después de las dosis anteriormente indicadas se observa en la figura 27 que los sólidos suspendidos totales se comportaron de manera similar sin presenciar mayores cambios.

Figura 27. Efecto de la dosificación de los flocculantes sobre los sólidos suspendidos totales



Fuente: elaboración propia según datos experimentales.

En la segunda fase de la investigación con base en la eficiencia energética, en la tabla XXVII se presentan comparaciones del poder calorífico de los lodos obtenidos, con el agente orgánico en comparación con el agente inorgánico, sometidos a diferentes condiciones de secado, así como la comparación de estos con otros compuestos de interés y de uso común a nivel industrial en el uso en calderas y sistemas de cogeneración.

Tabla XXVII. **Comparaciones de poder calorífico de lodos obtenidos a nivel de laboratorio con lodos de depuradoras producidos industrialmente**

Fuente	Condiciones	PCS MJ/kg	PCI MJ/kg	Referencia
Lodos primarios generados en la Planta Santa Isabel II con agente Clear Aqua	Secados en horno	16.60		Datos experimentales, laboratorio de aguas y sólidos de AMSA, abril de 2019.
Lodos primarios generados en la Planta Santa Isabel II con agente Ecoclean 2300	Secados al horno	15.11		Datos experimentales, laboratorio de aguas y sólidos de AMSA, abril de 2019.
Lodos de depuradora	Secado térmico	12.55		Colomer, Alberola, Prats, Gallardo y Bovea (2009).
Lodos digeridos generados en la PTAR Santa Isabel II	Secados al ambiente		13.44	Datos experimentales, laboratorio de aguas y sólidos de AMSA, abril de 2019.
Lodos primarios generados en la Planta Santa Isabel II con agente Ecoclean 2300	Secados al ambiente		14.72	Datos experimentales, laboratorio de aguas y sólidos de AMSA, abril de 2019.
Lodos primarios generados en la Planta Santa Isabel II con el agente Clear Aqua	Secados al ambiente		12.94	Datos experimentales, laboratorio de aguas y sólidos de AMSA, abril de 2019.
Lodos de depuradora	Secados al ambiente		8.37	Colomer, Alberola, Prats, Gallardo y Bovea (2009).
Lignito	Almacenado al ambiente		13.37	Coordinación General de Minería, Dirección General de Desarrollo Minero, México (2014).

Valores en cursiva no forman parte del presente estudio. Sirven para comparación ya que son compuestos de interés y de uso común que son utilizados a nivel industrial para obtener energía calorífica (cogeneración.)

Fuente: elaboración propia según datos experimentales.

Como parte de la primera fase de la investigación se proyectó el biosólido generado por el funcionamiento de la planta de tratamiento con los agentes floculantes. En esta fase las variables independientes como el caudal, el tipo de sólidos presentes en el afluente y el tratamiento térmico de secado confirieron las características físicas y energéticas a cada lodo generado.

Con base en lo anterior, en la tabla XXVIII el lodo generado por el funcionamiento de la planta de tratamiento se proyectó como el menor con una biomasa disponible anual de 67 ton/año y un inventario de 899 GJ/año. Lo anterior equivale a una potencia aportada de 57 kW y una proyección anual de energía de 249 660 kWh.

El lodo generado con el agente inorgánico Clear Aqua y deshidratado con tratamiento térmico en horno se proyectó como el mejor frente al tratamiento térmico solar ya que se estimó una biomasa disponible anual de 198.5 ton/año y un inventario de 3 296 GJ/año. Lo anterior equivale a una potencia aportada de 209 kW y una estimación anual de energía de 915 420 kWh. En el tratamiento térmico solar se documentó una biomasa total de 249 ton/año y un inventario de 2 321 GJ/año. Lo anterior equivale a una potencia aportada de 204 kW y una proyección anual de energía de 893 520 kWh.

El lodo generado con el agente orgánico Ecoclean 2300 y deshidratado con tratamiento térmico solar se proyectó como el mejor frente al tratamiento térmico en horno ya que se registró una biomasa de 232 ton/año y un inventario de 3 412 GJ/año. Lo anterior equivale a una potencia aportada de 216 kW y una contribución anual de energía de 946 080 kWh. El tratamiento térmico en horno generó una biomasa de 159.5 ton/año y un inventario de 2 410 GJ/año. Lo anterior equivale a una potencia aportada de 153 kW y una valorización anual de energía de 670 140 kWh.

Tabla XXVIII. **Elaboración del inventario energético de lodos generados en la PTAR en comparación de los obtenidos por agentes floculantes por año**

Parámetros	Lodos sin floculantes	Lodos con Clear Aqua	Lodos con Ecoclean 2300
Caudal L/s	15	15	15
Metros cúbicos agua tratada por año	473 040	473 040	473 040
Secado al ambiente 40 °C a 50% humedad relativa			
Tiempo de secado (días/100 mL)	7	7	7
Biomasa (ton/año) disponible	67	249	232
PCI MJ/kg	13.44	12.95	14.72
Inventario GJ/año	899	3 221	3 412
Eficiencia energética %	100	358	379
Potencia proyectada kW	57	204	216
Energía estimada por año kWh	249 660	893 520	946 080
Secado en horno 105 °C a 10% humedad relativa			
Tiempo de secado (días/100 mL)		2	2
Biomasa (ton/año) disponible		198.5	159.5
PCS MJ/kg		16.6	15.11
Inventario GJ/año		3 296	2 410
Eficiencia energética %		366	267
Potencia proyectada kW		209	153
Energía estimada por año kWh		915 420	670 140

Abreviaturas. (PCI) poder calorífico inferior, (PCS) poder calorífico superior, (kWh) kilovatio-hora, a 4 380 horas de consumo por año (12 horas/día).

Fuente: elaboración propia según datos experimentales.

En la segunda fase se determinó la eficacia del funcionamiento de la tecnología de la planta de tratamiento sobre los parámetros físicos (tabla XXIX). Se documentó que removió el 97 % de los sólidos suspendidos totales, el 98 % de la turbiedad y el 95 % del color aparente. En relación con los nutrientes se registró que no es eficaz para retirar fósforo (6 % de orto fosfato y 38 % de fósforo total), de igual forma no presenta una adecuada eficacia para retirar nitrógeno total (únicamente el 65 %).

Se evaluó la eficacia al únicamente utilizar la dosis óptima del agente Clear Aqua y del agente Ecoclean 2300 (tabla XXIX), en el tratamiento de aguas residuales de tipo ordinario para obtener la mayor concentración de lodos y así disponer del agua según los resultados fisicoquímicos y biológicos.

Con base en lo anterior, la eficacia del agente inorgánico Clear Aqua sobre parámetros físicos y se documentó que retiró el 95 % de sólidos suspendidos totales, el 98 % de la turbiedad y el 96 % del color aparente. En relación con los nutrientes se registró que es eficaz para retirar fósforo (98 % del orto fosfato y 97 % de fósforo total), sin embargo, no presenta una adecuada eficacia retirar para nitrógeno total (únicamente el 39 %).

También se evaluó la eficacia del agente orgánico Ecoclean 2300 sobre parámetros físicos y se documentó que retiró el 89 % de los sólidos suspendidos totales, el 94 % de la turbiedad y el 91 % del color aparente. En relación con los nutrientes se registró que es eficaz para retirar fósforo (85 % del orto fosfato y 90 % de fósforo total), sin embargo, no presenta una adecuada eficacia para retirar nitrógeno total (únicamente el 15 %). Con el uso de los agentes floculantes se documentó un incrementó en el nitrógeno de amonio en comparación con el funcionamiento de la planta de tratamiento sin floculantes.

Tabla XXIX. **Evaluación de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos en aguas residuales al utilizar agentes flocculantes en comparación con el funcionamiento de la planta**

Parámetros	Entrada sin tratamiento	Salida sin tratamiento	Entrada Clear Aqua	Entrada Ecoc 2300	Limite AG 236-06
pH	7.48	8.19	7.25	7.13	6-9
Color aparente (U. Pt/Co)	3 520	166	155	313	500
Color verdadero (unidades Pt/Co)	146	90	48	52	500
Turbiedad (NTU)	404	5	7	22	NA
DQO (mg/L O ₂)	981	72	341	375	NA
DBO ₅ (mg/L O ₂)	680	16	140	170	200
Microbiología NMP/mL	1.9x10 ⁶	5.6x10⁴	3.9x10⁵	4.7x10⁵	<1x10 ⁴
Sólidos susp. totales (mg/L)	298	8	15	33	100
Ortofosfatos (mg/L)	5.9188	5.5735	0.1030	0.8844	NA
Fosforo total (mg/L)	9.8741	6.1237	0.3042	1.0057	5
Nitrógeno de amonio (mg/L)	28.6932	7.0009	36.2260	36.0693	NA
Nitrógeno total (mg/L)	69.7195	24.2033	42.6488	58.8909	10

Valores en negrita no cumplen con AG 236-2006. **NA:** no aplica a la norma.

Fuente: elaboración propia según datos experimentales.

Desde el punto de vista biológico en la tabla XXX se observa que el sistema de funcionamiento de la planta de tratamiento redujo la población bacteriana y presentó una eficacia del 97 % tanto en el conteo de coliformes totales como en la DBO₅, sin embargo, el tratamiento con el agente Clear Aqua presentó una eficacia del 79 % y el tratamiento con el agente Ecoclean 2300 presentó una eficacia del 75 % en los parámetros antes mencionados.

Tabla XXX. **Porcentaje de eficacia del tratamiento de aguas residuales de tipo ordinario cuando se utilizan agentes floculantes**

Parámetros	% de eficacia del tratamiento		
	Salida sin tratamiento	Entrada con Clear Aqua	Entrada con Ecoclean 2300
Color aparente	95	96	91
Color verdadero	38	67	64
Turbiedad	98	98	94
DQO	92	65	62
DBO₅	97	79	75
Microbiología coliformes totales	97	79	75
Sólidos suspendidos totales	97	95	89
Ortofosfatos	6	98	85
Fosforo total	38	97	90
Nitrógeno total	65	39	15

Fuente: elaboración propia según datos experimentales.

En la tercera fase de la investigación se realizaron propuestas de mejora en los procesos de generación de lodos y de la calidad del agua en plantas de tratamiento de agua residual de tipo ordinario. Una de las propuestas de mejora de detalla en la tabla XXXI, donde se puede observar los diferentes montos económicos en base al caudal de diseño que se desee instalar.

También esta propuesta de diseño se puede observar desde el punto de vista de la tecnología, ya que tecnologías como el reactor anaeróbico de flujo ascendente y el sistema biológico secundario construido en sitio poseen un monto similar de inversión inicial, sin embargo, el caudal nominal de estos sistemas es menor en comparación con la implementación del sistema de flotación por aire disuelto con floculantes, como se observa en la tabla XXXI.

Tabla XXXI. **Proyección de inversión económica inicial de diversas tecnologías de tratamiento de aguas residuales de tipo ordinario**

Sistema	Caudal de diseño (L/s)	Inversión inicial (Q)
PTAR módulos prefabricados para reactor anaeróbico de flujo ascendente	0.29	245 138
PTAR construida en sitio tratamiento biológico secundario	0.29	301 948
Planta de tratamiento Santa Isabel II tratamiento biológico secundario	25	28 583 531
Sistema de flotación por aire disuelto con floculantes	25	1 623 000

Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de AMSA (2001). *Estudio de diagnóstico y plan de rehabilitación de dieciocho plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas, informe final.*, Rodas Ruiz (2003). *Determinación del costo directo de construcción de una planta de tratamiento con la ayuda de la programación pert-tiempo.*, Hernández Gramajo (2014). *Comparación de costos entre una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas prefabricada y una construida en sitio* y Daftech Engineers PVT. LTD, (2018). *Float cell. A cost effective dissolved clarifier backs by more than two decades of experience. Dissolved air flotation clarifier.*

Dentro de las alternativas de mejora se proyectó el costo del tratamiento del agua por metro cúbico por medio de la combinación de las diferentes tecnologías propuestas, como se indica en la tabla XXXII. En el apartado de apéndices se detallan los insumos y los materiales utilizados, así como el cálculo del precio del agua tratada por metro cúbico.

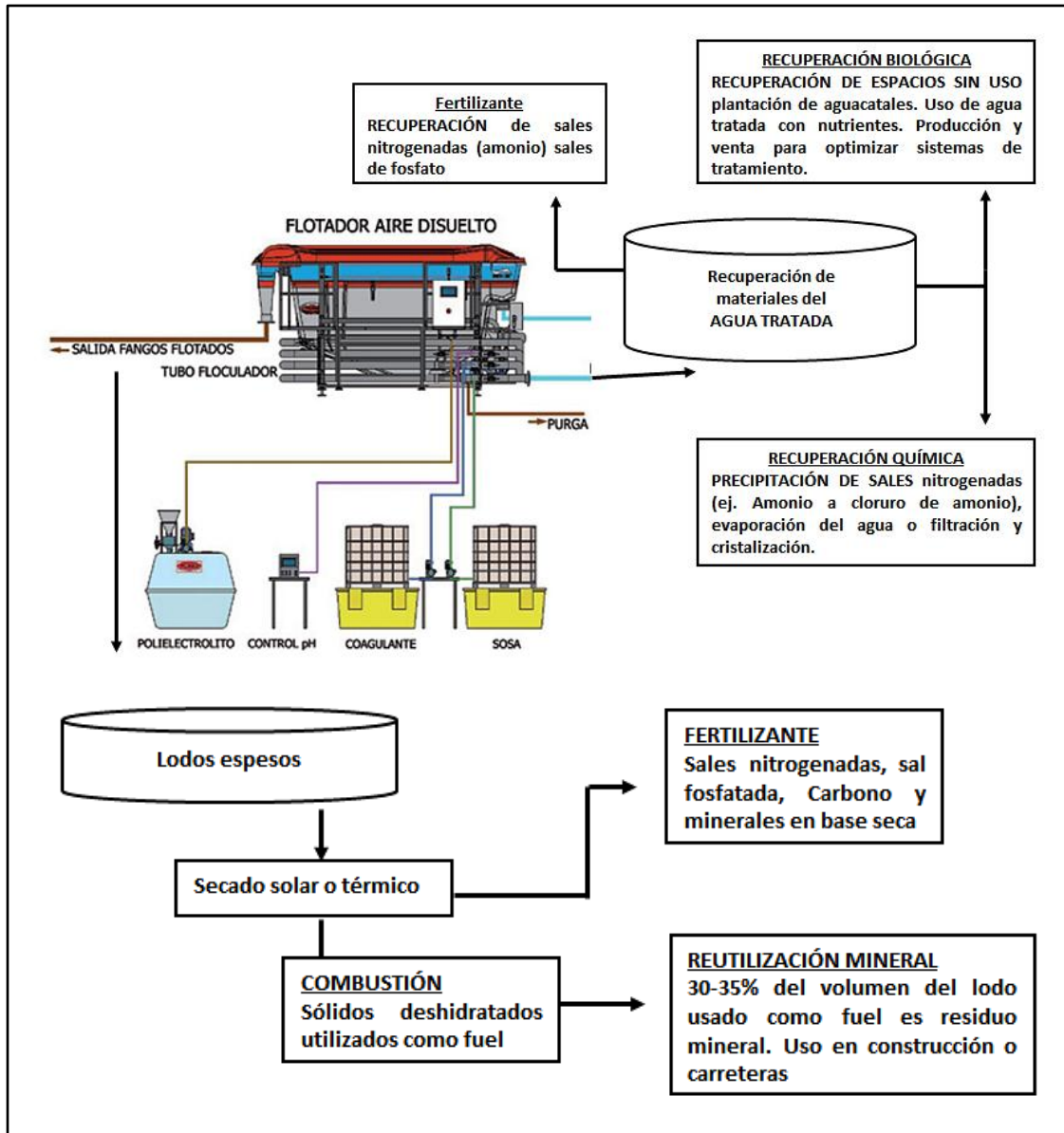
Tabla XXXII. **Comparación del precio del agua tratada por metro cúbico por medio de diferentes tecnologías**

Sistema de tratamiento con caudal de diseño de 20 L/s	Sistemas empleados	Costo (Q) por metro cúbico
Planta de tratamiento tipo biológico secundario Santa Isabel II	Biológico secundario	1.12
Planta de tratamiento Santa Isabel II con Agente Clear Aqua dosis 200 µL/L	Sedimentación + terciario	11.69
Planta de tratamiento Santa Isabel II con Agente Ecoclean 2300 dosis 400 µL/L	Sedimentación + terciario	32.86
Sistema de flotación por aire disuelto con Agente Clear Aqua dosis 100 µL/L	Flotación + terciario	5.68
Sistema de flotación por aire disuelto con Agente Ecoclean 2300 dosis 100 µL/L	Flotación + terciario	8.32

Fuente: elaboración propia según datos experimentales.

Dentro de esta misma sección se realizó una revisión bibliográfica para proponer la reutilización de los lodos y el agua tratada, teniendo como ejes de trabajo, la valorización energética de lodos y el agua obtenida durante el proceso de floculación. Las tecnologías propuestas en la figura 28 para la obtención de subproductos son compatibles con la dinámica energética, ambiental, así como social y se pueden utilizar sin ningún problema en un entorno local.

Figura 28. Propuesta para tratamiento y valorización de los lodos y el agua procedentes del proceso de floculación



Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de Toro Equipment (2009). *Anaconda, sistema de flotación por aire disuelto de alto rendimiento. Catálogo de productos y especificaciones técnicas* y Veolia Water Technologies (2005). *Soluciones tecnológicas para tratamiento y valorización de lodos de depuradora. Catálogo de productos.*

Finalmente, para esta sección se detalló en la tabla XXXIII los beneficios económicos de la obtención y el uso de los materiales y subproductos obtenidos del proceso de floculación.

La propuesta de alternativas de mejoras propone dos grandes servicios: la venta de sólidos deshidratados al ambiente por medio de su volumen o inventario energético anual y la venta de frutos obtenidos anualmente de árboles utilizados como un sistema biológico de reutilización de agua en recuperación de nutrientes.

Cabe destacar que también se aplicó a la planta de tratamiento de aguas residuales Santa Isabel II como una propuesta de recuperación y uso del terreno disponible dentro del sistema de tratamiento que actualmente no tiene ningún fin. Para la planta de tratamiento Santa Isabel se proyectó una ganancia de hasta Q. 467 000 anuales cuando las plantaciones de aguacate ya estén en su etapa adulta o de producción, así como ganancias de más de un millón de quetzales anuales con los sistemas de flotación por aire disuelto (SFAD) que utilizan agentes floculantes.

Tabla XXXIII. **Propuesta de economía circular de la planta de tratamiento al comercializar materiales y subproductos**

Venta	Unidad	Precio unidad (Q)	Producto anual	Ingreso económico anual (Q)		
				PTAR Santa Isabel II	Sistema SFAD + Ecoclean 2300	Sistema SFAD + Clear Aqua
Sólidos deshidratados al ambiente	Tonelada	1 000	67 ^a	67 000		
			249 ^a		249 000	
			232 ^a			232 000
Frutos aguacates	Aguacate	2.0	160 000 ^b	320 000		
			320 000 ^b		800 000	
			320 000 ^b			800 000
Total (Q)				467 000	1 049 000	1 032 000

a. toneladas/año. **b.** unidades (aguacates/año).

Fuente: elaboración propia según datos experimentales.

6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En la presente investigación se estimó que anualmente la planta de tratamiento Santa Isabel II puede generar 67 toneladas/año de biosólidos deshidratados al ambiente y se documentó que cada kg de sólido posee un PCI de 13.41 MJ/kg. Este poder calorífico es comparable con el registrado por otros autores como Colomer Mendoza, Alberola, Herrera Prats, Gallardo Izquierdo y Bovea (2009), que han evaluado la capacidad calorífica de lodos de depuradoras en España (PCI de 8.37 MJ/kg y PCS 12.55 MJ/kg). Estos sólidos también han sido comparados por estos autores con el poder calorífico del lignito (13.37 MJ/kg).

Sin embargo, esta proyección energética fue más eficiente al incluir no solo los sólidos sedimentables, sino también los sólidos suspendidos totales y los sólidos disueltos, por medio de mecanismos fisicoquímicos. Se determinó que se podrían aprovechar (y sumar a los sólidos sedimentables), en promedio 227 mg/L de sólidos suspendidos totales y 461 mg/L de sólidos disueltos totales.

Posteriormente a la obtención de lodos, el secado consistió en someter los lodos obtenidos con los agentes floculantes a la aplicación de calor (temperatura de 105 °C), para retirar el exceso de humedad y posteriormente extraer las moléculas de agua que están dentro de la matriz del sólido. Pero el secado térmico se determina como un gran demandante de energía y no es viable para procesos de deshidratación, ya que esta investigación se centró en la gestión energética a través de fuentes no convencionales como los biosólidos (Elías, 2013).

Para Elías (2013), los sistemas mecánicos como la centrifuga, el filtro de banda, la prensa mecánica y los contenedores de deshidratación con filtros de poros especializados consumen poca o ninguna cantidad de energía por unidad de lodo secado. Sin embargo, el secado también depende de la naturaleza física del lodo por tratar. Según Elías (2013), se ha estimado que, para lodos provenientes de aguas residuales de tipo ordinario, la composición biológica se mantiene invariable y se componen de 28 % de proteínas, 20 % de carbohidratos, 7 % de lípidos, 10 % de fibras y 35 % de material inerte.

Cabe destacar que el uso de agentes floculantes como el polímero catiónico de aluminio presentó interferencia (disminución en el poder calorífico en los lodos secados al ambiente), ya que al contener aluminio hidrolizado se generó un aluminio gelatinoso que es un interferente en el secado de lodos (Ledó, Lima, Paulo y Duarte, 2009). A diferencia de este, el agente Ecoclean 2300 contiene en su composición polímeros y proteínas de alto peso molecular de origen natural y es análogo estructuralmente a lo encontrado las aguas residuales. Lo anterior implica ventajas como menor grado de compactación del sólido y de aprisionamiento de las moléculas de agua que pueden responder mejor al tratamiento de secado (*Eco Health Products Private Limited, 2018*).

Con base en lo anterior, se puede concluir que la cantidad de sólidos que la planta de tratamiento Santa Isabel II puede proporcionar por año con el apoyo de agentes floculantes está condicionado por el caudal y por la composición biológica e inorgánica que aporta determinado caudal. Sin embargo, la eficiencia energética de los sólidos generados con los agentes floculantes va a depender exclusivamente del proceso de secado que se implemente en la planta de tratamiento.

A pesar de lo anteriormente descrito, las toneladas de sólidos proyectadas con el uso de agentes floculantes pueden ser las suficientes para hacer un cambio significativo en la matriz energética de pequeñas industrias a nivel local para la generación de energía. En comparación con el funcionamiento ordinario de una planta de tratamiento convencional, al utilizar los agentes Ecoclean 2300 y el agente Clear Aqua se reportó un aumento de la eficiencia energética de 379 y 358 %, respectivamente.

Este aumento de la eficiencia energética de lodos, según lo documentado por Elías (2013), se debe a que la estructura energética de los sólidos la aporta en su mayoría la biomasa microbiana (capturada en los flóculos), con un 40 % en peso y un PC de 3.79 MJ/kg, seguido de grasas y aceites con 15 % en peso y un PC de 5.30 MJ/kg, además de un 10 % de material lignocelulósico que aporta un PC de 1.57 MJ/kg. Por lo que se concluye que el uso de agentes floculantes recuperaron la mayor cantidad de componentes biológicos (disueltos y no disueltos) que aportaron un poder calorífico útil y en consecuencia aumentaron la oferta energética.

Por otra parte, en base al segundo objetivo, la evaluación de la eficacia del tratamiento de aguas residuales los agentes floculantes actuaron removiendo nutrientes y sólidos suspendidos. Lo anterior es un hallazgo y un aporte valioso de esta investigación, ya que nutrientes como los fosfatos no cumplen en el efluente de la planta de tratamiento Santa Isabel II, según el Acuerdo Gubernativo Número 236-2006 (en el artículo 62) el límite máximo permisible (LMP) del fósforo de los entes que efectúen descargas a cuencas de lagos tienen la obligación de cumplir con 5.0 mg/L. Es importante resaltar que para entes generadores nuevos dentro de la cuenca del lago de Amatitlán deben cumplir con 5.0 mg/L desde el inicio de sus operaciones.

El principal problema del efluente de la planta de tratamiento Santa Isabel II no es el incumplimiento de la descarga referente al Acuerdo Gubernativo Número 236-2006, ya que esta concentración de fosforo (5.0 mg/L), aún es demasiado permisible y una concentración por debajo de este límite es perjudicial para los cuerpos de agua receptores y se transportará por el río Villalobos, el cual tiene su desembocadura en el lago de Amatitlán.

El ion orto fosfato es un nutriente que está en un estado biológicamente disponible y es necesario para el crecimiento de los organismos. Según Paerl (2014) y Míguez (2016), una concentración que pueda exceder el límite de orto fosfatos de 10 microgramos por litro ($\mu\text{g/L}$) en un cuerpo de agua, otorga un enriquecimiento de este nutriente, que, sumado a las condiciones ambientales adecuadas, son propicias para el crecimiento masivo de algas y otros organismos conocidos como productores primarios.

Sin embargo, el mejoramiento de los sistemas remoción de sólidos suponen para esta investigación un aumento del 358 % al utilizar el agente Clear Aqua y un 379 % al utilizar el agente Ecoclean 2300, respecto de los sólidos que se pueden generar únicamente con el funcionamiento de la planta de tratamiento que ya están construidas en un sitio, como la planta de tratamiento Santa Isabel II.

Con base en lo anterior, el diseño de sistemas de tratamiento biológico de tipo secundario son una alternativa muy costosa si se quiere combinar con el uso de agentes floculantes. Además, los sistemas de tratamiento convencionales solo cuentan con conos Imhoff que actúan por medio de la gravedad y el peso de los flóculos para ser captados, lo que incrementa la dosis de agentes floculantes lo que, a su vez, aumenta el costo unitario del agua (metro cúbico de agua tratada).

Con el objetivo de crear alternativas de mejora en la captación de sólidos y aplicar un adecuado tratamiento clarificador al agua, se promovió el uso de tecnologías más eficientes para remover sólidos suspendidos y se combinaron con el uso de agentes floculantes en dosis óptimas. Con base en lo anterior, se obtuvo una proyección de optimización de procesos y reducción del espacio de uso para el tratamiento del agua (*Toro Equipment, 2009*). A la vez, las tecnologías alternativas, propuestas en esta investigación, son la flotación de los sólidos por aire disuelto, que optimiza el uso de agentes coagulantes-floculantes, lo que hace que se utilice una dosis óptima (100 $\mu\text{L/L}$).

Esto puede potenciar el efecto del sistema sobre los sólidos suspendidos y que a su vez actué en la remoción de sólidos disueltos, ya que posee una tecnología que maximiza la generación de lodos por concentración (flotación y sedimentación) y al mismo tiempo remueve nutrientes disueltos de importancia ecológica como el ion orto fosfato (*Daftech Engineers PVT. LTD, 2018*).

Según Gardiazabal, Mena, Torres y Pinto (2015), una ganancia en la optimización del uso del terreno donde se construyen los sistemas de tratamiento de aguas residuales de tipo ordinario, pueden ser de beneficio para implementar sistemas agrícolas de cultivo muy intensivo, no solo para aprovechar el terreno, sino para reforestar y reutilizar el agua tratada para regar dichos cultivos.

Un hallazgo relevante en este estudio fue que el agua tratada por medio de los dos agentes floculantes incrementó el amonio por medio de un proceso de óxido-reducción, lo que evitaría el uso y la compra de fertilizantes que contienen amonio que se elabora por medio del proceso Haber – Bosch, siendo este un nutriente sintetizado y no de origen natural (*Andrade Ochoa, Erosa de la Vega y Nevárez Moorillón, 2015*).

A su vez, con los beneficios anteriormente descritos se proyectó una venta de materiales y subproductos provenientes del tratamiento del agua, para que la planta de tratamiento sea auto sostenible y no dependa del capital de otras instituciones.

Con base en lo anterior, el terreno de la planta Santa Isabel II (2.2 hectáreas), puede actuar como un gran sistema de infiltración donde un cultivo muy intensivo de aguacate Hass, en una hectárea de la planta de tratamiento (densidad del cultivo de 2.5 x 2.5 metros), puede ser designado para la producción y el máximo beneficio del cultivo de aguacate, al plantar 1 600 plántulas de aguacate Hass (Bartoli, 2008 y Gardiazabal, Mena, Torres y Pinto, 2015).

Este gran sistema de infiltración funciona al descargar el agua tratada en el área de cultivo donde los nutrientes son absorbidos y el agua puede llegar al manto freático (Bartoli, 2008; Gardiazabal, Mena, Torres y Pinto, 2015). Esta acción proyectó un ingreso económico anual de hasta Q. 467 000, flujo económico que actualmente no se recibe y que podría ser utilizado para el mantenimiento de las plantas de tratamiento.

La actividad agrícola anteriormente descrita es avalada por el capítulo VII, (parámetros de aguas para reúso y artículo 34, autorización de reúso), del Acuerdo Gubernativo 236-2006, en donde el efluente de este sistema de tratamiento con floculantes puede ser utilizado en reúso para riego agrícola en general (no para cultivos comestibles que estén en contacto directo con el suelo), también se documentó que es viable su uso del efluente en acuicultura, para piscicultura y camaronicultura.

Según Rojas Remis y Mendoza Espinoza (2012), este tipo de investigaciones contribuye con el tratamiento y aprovechamiento de un material biológico potencialmente peligroso, al convertirlo en un material para la producción de energía, al mismo tiempo que el agua utilizada y convertida en agua residual de tipo ordinario, se retornará con una mejor calidad en base a parámetros fisicoquímicos de importancia como los sólidos suspendidos totales y nutrientes como el ion orto fosfato.

CONCLUSIONES

1. En comparación con lodos producidos por el funcionamiento de la planta de tratamiento los agentes floculantes incrementaron la generación de lodos y su eficiencia energética en un 379 % cuando se utilizó el agente orgánico Ecoclean 2300 y un 358 % de eficiencia cuando se utilizó el agente inorgánico Clear Aqua. Estas eficiencias se obtuvieron cuando los lodos fueron deshidratados en condiciones ambientales.
2. Con el uso de agentes floculantes se documentó un aumento en la cantidad de lodos generados ya que se proyectaron 232 toneladas y una potencia aportada de 216 kW con agente orgánico Ecoclean 2300. Se estimaron 249 toneladas con una potencia aportada de 204 kW con el agente inorgánico Clear Aqua cuando estos lodos fueron deshidratados en condiciones ambientales.
3. Por medio de ecuaciones de regresión lineal se observó una correlación entre la dosis óptima aplicada de los floculantes y los parámetros fisicoquímicos de calidad del agua. Los ensayos de laboratorio indicaron que se obtuvieron porcentajes de eficacia de remoción en parámetros de importancia como color aparente, turbiedad y sólidos suspendidos totales de hasta un 98 % cuando se utilizó el agente inorgánico Clear Aqua. Cuando se utilizó el agente orgánico Ecoclean 2300 también presentó una correlación lineal y se redujeron los parámetros fisicoquímicos antes mencionados, pero solo en un 85 %.

4. El costo por metro cúbico de agua tratada se proyectó en Q. 5.68 con el agente inorgánico Clear Aqua y Q. 8.32 con el agente orgánico Ecoclean 2300, sin embargo, este precio ya incluye la remoción de fósforo disuelto como un tratamiento terciario. Comparado con el costo por metro cúbico de la planta de tratamiento Santa Isabel II (Q. 1.12), el cual es más económico pero los sistemas de tipo biológico secundario no remueven nutrientes, principalmente el fósforo.
5. Se diseñó una alternativa de mejora que se estimó en Q. 1 623 000, que puede sustituir los sistemas antiguos de tratamiento de agua. Posee una tecnología que maximiza la generación de lodos por concentración (flotación y sedimentación), mejora los parámetros fisicoquímicos al remover nutrientes, disminuye el tiempo de residencia del agua en el sistema de tratamiento y únicamente necesita 100 m² para su funcionamiento.
6. Con la tecnología propuesta en la alternativa de mejora se estimó una economía circular, en comparación con las tecnologías de tratamiento actuales que no generan ningún ingreso económico. La valorización energética de los biosólidos deshidratados en condiciones ambientales y plantaciones de cultivos frutales se proyectaron Q. 1 032 000 anuales.

RECOMENDACIONES

1. Realizar una descripción cualitativa del lodo generado por medio de una muestra para análisis de granulometría a fin de profundizar en la sedimentación y compactación del lodo primario, ya que en las muestras se observaron partículas de tamaño variable que no fueron objeto de estudio en este trabajo de investigación.
2. Es recomendable la evaluación de la obtención de lodos al ajustar el pH del agua residual con el pH óptimo de funcionamiento del agente orgánico Ecoclean 2300 y el agente inorgánico Clear Aqua, según lo indicado por el fabricante, ya que en este estudio solo se evaluó la eficacia de remoción del agente floculante con el pH del agua del afluente.
3. Proponer a los agentes floculantes como una acción correctiva al sistema de tratamiento de la planta Santa Isabel II, el cual puede consistir en colocar un dosificador entre los filtros percoladores y el clarificador para remover los sólidos suspendidos aun presentes y establecer un tratamiento terciario para remover nutrientes de interés ecológico como el ion orto fosfato.
4. Dado que se estimó un cultivo muy intensivo y una producción significativa de frutos de aguacate durante la estimación del proyecto, se recomienda continuar con investigaciones sobre características energéticas y ambientales de este cultivo para que puedan ser integradas en futuros proyectos en las comunidades.

5. En base a la cantidad de sólidos deshidratados y energía estimadas por año en este proyecto, se deberá diseñar un estudio que tenga como objetivo, un modelo predictivo para el control y seguimiento de la generación del lodo primario, a través de la sedimentación y la compresibilidad, a fin de optimizar la productividad y asegurar un abastecimiento del biocombustible durante el establecimiento del proyecto.

REFERENCIAS

1. Acuerdo Gubernativo Número 236-2006. Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. Reglamento de las descargas y reúsos de aguas residuales y de la disposición de lodos. Diario de Centro América. Guatemala. 05 de mayo de 2006. Recuperado de http://fedavicac.com/descargas/Guatemala%201/AG%20236_06%20AGUAS%20RESIDUALES.pdf
2. Acuerdo Gubernativo Número 137-2016. Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. Reglamento de Evaluación, control y seguimiento ambiental. Diario de Centro América. Guatemala. 12 de julio de 2016. Recuperado de https://cta-consultoria.com/wp-content/uploads/2013/11/AG-137-2016_Reglamento-de-Evaluacion-Control-y-Seguimiento-Ambiental.pdf
3. Acuerdo Ministerial Número 199-2016. Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. Listado taxativo de proyectos, obras, industrias o actividades. Diario de Centro América. Guatemala, Guatemala. 14 de julio de 2016. Recuperado de <https://greendevlopment.com.gt/wp-content/uploads/2016/07/Acuerdo-Ministerial-199-2016.pdf>

4. American Public Health Association (APHA). (2017). *Standard methods for examination of water and wastewater*, 23rd Ed. Washington, D. C., United States of America: American Public Health Association (APHA) the American Water Works Association (AWWA) and the Water Environment Federation (WEF).
5. American Society for Testing Materials (ASTM) (2006). *Standard Test Method for Determining Sediment Concentration in Water Samples (D 3977-97)*. Pennsylvania, United States of America: Annual Book of Standards. Water and Environmental Technology.
6. Andrade Ochoa, S., Erosa de la vega, G. y Nevárez Moorillón, G. V. (julio, 2015). Amonio-oxidasas bacterianas y arqueales involucradas en el ciclo del nitrógeno. *Revista Tierra Latinoamericana*, 33(3), 233-245. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v33n3/2395-8030-tl-33-0300233.pdf>
7. AquaSistemas (2019). *Artículos para mantenimiento. Sección Químicos. Clarificador ClearAqua para una piscina clara y cristalina.* Guatemala: Autor. Recuperado de <https://aquasistemas.com.gt/producto/clarificador-clearaqua>
8. Arocena, R. y Conde, D. (1999). *Métodos en ecología de aguas continentales. Con ejemplos de Limnología en Uruguay.* Montevideo, Uruguay: Instituto de Biología. Comisión Sectorial de Investigación Científica de la Universidad de la República.

9. Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y del Lago de Amatitlán (AMSA) (2001). *Estudio de diagnóstico y plan de rehabilitación de dieciocho plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas, informe final*. Guatemala: ECOPLAN Consultores y Asociados, S. A.
10. Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y del Lago de Amatitlán (AMSA) (2019). *Estudio de diagnóstico y plan de mejora de la planta Santa Isabel II, informe final*. Guatemala: Autor.
11. Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y del Lago de Amatitlán (AMSA) (2019). *Manual de sistemas de análisis y procedimientos operativos para el monitoreo de plantas de tratamiento de AMSA versión 2019*. Guatemala: Autor.
12. Avalos Ochoa A. A. (2019). *Evaluación de la planta de tratamiento de aguas residuales del municipio de la Palma, departamento de Chalatenango, El Salvador* (Tesis de licenciatura.). Universidad de El Salvador, El Salvador. Recuperado de <http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/19737/1/13101694.pdf>
13. Bartoli, J. A. (2008). *Manual técnico del cultivo de aguacate has (Persea americana L.)*. Tegucigalpa, Honduras: Fundación Hondureña de Investigación Agrícola. Recuperado de <http://www.avocadosource.com/books/AlfonsoJose2008.pdf>
14. Berdonces, J. L. (2010). *Diccionario ilustrado de las plantas medicinales*. Madrid, España: Grupo Editorial Océano.

15. Bolaño Ennis, A. N. (2009). *Sistema de flotación por aire disuelto para el tratamiento de aguas residuales industriales* (Tesis de licenciatura). Universidad EIA (Escuela de Ingeniería de Antioquia). Colombia. Recuperado de https://repository.eia.edu.co/bitstream/handle/11190/1918/Bola%C3%B1oAlberto_2009_SistemaFlotacionAire.pdf?sequence=1 y Allowed=y
16. Cabildo de Tenerife (2007). *Descripción de la situación actual de la gestión de residuos (Generación actual de residuos en la isla de Tenerife)*. Tenerife: Autor.
17. Cáceres, et al. (july, 1991). Pharmacological properties of *M. oleifera*. 1: Preliminary screening for antimicrobial activity. *Journal of Ethnopharmacology*, 33(3), 213-216. Recovered from https://docksci.com/pharmacological-properties-of-moringa%20oleifera-1-preliminary-screening-for%20antim_5f06184e097c474e308b456a.html
18. Castells, X. E. (2012). *Vías de tratamiento y valorización de fangos de depuradora*. Madrid, España: Ediciones Díaz De Santos.
19. Chuang, P.H. et al. (february, 2007). Anti-fungal activity of crude extracts and essential oil of *Moringa oleifera* Lam. *Bioresource Technology*. 98(1), 232-236. Recovered from https://www.researchgate.net/publication/7364721_Antifungal_activity_of_crude_extracts_and_essential_oil_of_Moringa_oleifera_Lam

20. Colomer Mendoza, F. J., Alberola, C., Herrera Prats, L., Gallardo Izquierdo, A. y Bovea, M. D. (marzo, 2009). Viabilidad de la valorización energética de lodos procedentes de distintos tipos de depuradoras. *Revista de la Universitat Jaume I, Ingeniería de residuos*, 110(1). 32-37. Recuperado de <http://repositori.uji.es/xmlui/bitstream/handle/10234/22773/32650.pdf?sequence=1>

21. Daftech Engineers PVT. LTD, (2018). *Float cell. A cost effective dissolved clarifier backs by more than two decades of experience. Dissolved air flotation clarifier*. Chandigarh, India: Autor. Recovered from https://img1.exportersindia.com/product_images/bcfull/2018/11/347201/tbl_spec_1543303133_164022_p_4502244.pdf

22. Eco Health Products Private Limited (2018). *Water treatment Chemical, Organic Products*. Chennai, Tamil Nadu, India: Author. Recovered from https://www.ecohealth.in/assets/EcoHealth_Products_Catalogue.pdf

23. Eco Health Products Private Limited (2019). *Water treatment Chemical, Redefining purity with Ecoclean-2300*. Chennai, Tamil Nadu, India: Author. Recovered from <https://www.ecohealth.in/>

24. Elías, X. (2012). *Los residuos como combustibles. Tratamiento y valorización energética de residuos*. Madrid: Ediciones Díaz De Santos.

25. Elías, X. (junio, 2013). Secado y aprovechamiento energético de fangos de edar. *Revista Tecnología del agua*, 3(2), 34-44. Recuperado de https://www.google.com.gt/url?sa=tyrct=jyq=yesrc=sysource=webycd=ycad=rjajuact=8yved=2ahUKEwiwy8HW3djuAhWMuVkkHblbBRcQFjABegQIAxACYurl=https%3A%2F%2Fwww.tecnoaqua.es%2Fdescargar_documento%2Farticulo_tecnico_fangos_edar.pdf&usg=AOvVaw0GTDftu33RlaFOiZ-xQT2N
26. Flores Barrios, D. M. (2018). *Análisis de lodos de la planta de tratamiento de la Universidad Rafael Landívar para su uso como abono orgánico* (Tesis de licenciatura). Universidad Rafael Landívar, Guatemala. Recuperado de <http://recursosbiblio.url.edu.gt/tesisjrkd/2018/06/15/Flores-Daniela.pdf>
27. Gardiazabal, F., Mena, F., Torres, J. y Pinto, A. (febrero, 2015). Plantaciones de muy alta densidad (2,5 x 1,25m y 1,25 x 1,25m) en paltos (*Persea americana Mill.*) Cv logran en su primer año producción de más 40 t/ha. *VIII Congreso Mundial de la Palta*. Congreso llevado a cabo en Quillota, Chile. Recuperado de http://www.avocadosource.com/WAC8/Section_04/GardiazabalFrancisco2015b.pdf
28. Gómez Orea, D. y Gómez Villarino, M. (2013). *Evaluación de impacto ambiental*. 3ª. Ed. Madrid, España: Editorial MundiPrensa.

29. Guo, C. H. y Wang, C. L. (November, 2011). Plasma Aluminum is a Risk Factor for Oxidative Stress and Inflammation Status in Hemodialysis Patients. *Clinical Biochemistry*, 44(16), 1309-1314. Recovered from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S000991201102594X?via%3Dihub>
30. Hernández, M. A. (1992). *Depuración de aguas residuales. Servicio de publicaciones de la Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos*. Madrid, España: Autor.
31. Hernández Gramajo, J. C. (2014). *Comparación de costos entre una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas prefabricada y una construida en sitio* (Tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. Recuperado de http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_3786_C.pdf
32. Industria Sulfúrica S. A. (2014). *Sulfato de aluminio. Ficha técnica y de seguridad*. Montevideo: Autor. Recuperado de http://isusa.com.uy/files/2016-01/1453922817_ficha-de-seguridad-sulfato-de-aluminio-s-lido-web-.pdf
33. Jiménez. M. M. (2018). *Valorización de fangos de EDAR vía cogeneración y gestión de biogás* (Tesis de licenciatura). Universidad de Valladolid, España. Recuperado de <http://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/31341/TFG-P-875.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

34. Klein Droege, K. S. (2015). *Eficiencia de la remediación de parámetros de calidad del agua en la planta de tratamiento de aguas residuales "La Cerra", Villa Canales, Guatemala, 2008-2013* (Tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. Recuperado de http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/24/24_0184.pdf
35. Kremmer, F. M. y McCallion. (2001). *Manual del agua. Su naturaleza, tratamiento y aplicaciones. Nalco Chemical Company. Tomo I.* Colorado, United States of America: McGraw Hill.
36. Lédo, P., Lima., R., Paulo., J. Y Duarte, M. (febrero, 2009). Estudio comparativo de sulfato de aluminio y semillas de *Moringa oleifera* para la depuración de aguas con baja turbiedad. *Revista de Información Tecnológica*, 20(5), 3-12. Recuperado de <https://scielo.conicyt.cl/pdf/infotec/v20n5/art02.pdf>
37. Limón Macías, J. A. (2013). *Lodos de las plantas de tratamiento de aguas, ¿problema o recurso?* Distrito Federal, México: Autor. Recuperado de http://www.ai.org.mx/ai/images/sitio/201309/ingresos/jglm/doc_ingreso_gualberto_limon_trabajo_de_ingreso.pdf
38. Masters Builders Solutions (BASF) (2017). *Plantas de tratamiento de aguas residuales. Soluciones de reparación, protección e impermeabilización.* Barcelona: Autor. Recuperado de http://www.interempresas.net/FeriaVirtual/Catalogos_y_documentos/204158/20170508-catalogo-PLANTAS-de-TRATAMIENTO-de-aguas-RESIDUALES.pdf

39. Mavar Química S. A. (2009). *Producción de alumbre potásico. Ficha técnica y de seguridad*. Santiago: Autor. Recuperado de http://www.quimicamavar.cl/documentos/hojas_seguridad/MSDS%20Alumbre%20Potasico.pdf
40. Metcalf y Eddy, INC., Tchobanoglous, G., Burton, F. y Stensel, H. D. (2003). *Wastewater Engineering Treatment and Reuse* (4 Ed.). New York, United States of America: McGraw-Hill. Recovered from https://ptabdata.blob.core.windows.net/files/2017/IPR2017-01468/v22_FWS1016%20-%20Metcalf.pdf
41. Morán, M. J. Y Shapiro, H. N. (2005). *Fundamentos de termodinámica técnica*. (2ª. Ed). Barcelona, España. Editorial Reveré, S. A. Recuperado de <https://es.slideshare.net/fdc300/termodinmica-moran-shapiro>
42. Míguez, D. (diciembre, 2016). *Tecnologías de control de floraciones de cianobacterias y algas nocivas en cuerpos de agua, con énfasis en el uso de irradiación por ultrasonido*. Revista del Laboratorio Tecnológico de Uruguay, 2(12), 54-61. Recuperado de https://catalogo.latu.org.uy/opac_css/doc_num.php?explnum_id=2232
43. Narváez Rincón, P. C. (diciembre, 2010). Fuentes convencionales y no convencionales de energía: estado actual y perspectivas. *Revista de Ingeniería e Investigación Universidad Nacional de Colombia*, 30(3). 165-173. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/643/64316140016.pdf>

44. Organización Mundial de la Salud (OMS) (2006). *Guías para la calidad del agua potable. Primer Apéndice: Vol. 1: Recomendaciones*. (3ª. Ed.). Ginebra: Autor. Recuperado de https://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3_es_full_1_owsres.pdf
45. Pardo Buendía, M. (2002). *Evaluación del impacto ambiental y social para el siglo XXI. Teorías, Procesos, Metodologías*. Madrid, España: Omagraf, S. L.
46. Paerl, H. W. (December, 2014). Mitigating Harmful Cyanobacterial Blooms in a Human- and Climatically-Impacted World. *Life*, 4(4), 988-1012. Recovered from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4284478/>
47. Pérez, G., Vittori, D., Garbossa, G. y Nesse, A. (Marzo, 2002). Toxicidad del aluminio sobre el sistema eritropoyético: mecanismos involucrados / Aluminum toxicity in erythropoiesis: related mechanisms. *Acta Bioquímica Clínica Latinoamericana*, 36(1), 41-50. Recuperado de <https://pesquisa.bvsalud.org/portal/resource/pt/lil-312451>
48. Ramírez Bach, G. J. (2010). *Análisis de comportamiento de los materiales de construcción utilizados en plantas de tratamiento de aguas residuales y realización de caso práctico*. (Tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala. Recuperado de http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_3183_C.pdf

49. Rezabal, E., Mercero, J. M., López, X. y Ugalde, J. M. (September, 2007). A Theoretical Study of the Principles Regulating The Specific for Al(III) against Mg(II) in Protein Cavities. *Journal of Inorganic Biochemistry*, 101(9), 1192-1200. Recuperado de https://www.academia.edu/13764921/A_theoretical_study_of_the_principles_regulating_the_specificity_for_Al_III_against_Mg_II_in_protein_cavities
50. Rodas Ruiz, R. E. (2003). *Determinación del costo directo de construcción de una planta de tratamiento con la ayuda de la programación pert-tiempo* (Tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. Recuperado de http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_2348_C.pdf
51. Rojas Remis, R. Y Mendoza Espinosa, L. G. (Noviembre, 2012). Utilización de biosólidos para la recuperación energética en México. *Revista Producción + Limpia*, 7(2), 74-94. Recuperado de <http://www.scielo.org.co/pdf/pml/v7n2/v7n2a06.pdf>
52. Roldán Vilorio, J. (2013). *Energías renovables, lo que hay que saber*. Madrid, España: Ediciones Nobel.
53. Sánchez Martín, J., González Velasco M. y Beltrán Heredia, J. (May, 2009). *Acacia mearnsii de Wild* Tannin-Based Flocculant in Surface Water Treatment. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 29(2), 119-135. Recovered from <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/02773810902796146?needAccess=true>

54. Shen L. y Zhang D. (May, 2009). Low temperature pyrolysis of sewage sludge and putrescible garbage and fuel oil production. *Fuel, The Science and Technology of Fuel and Energy*, 84(7-8). 809-815. Recovered from https://www.researchgate.net/publication/222225134_Low-temperature_pyrolysis_of_sewage_sludge_and_putrescible_garbage_for_fuel_oil_production
55. Toro Equipment (2009). *Anaconda, sistema de flotación por aire disuelto de alto rendimiento. Catálogo de productos y especificaciones técnicas*. Madrid: Autor. Recuperado de https://www.interempresas.net/FeriaVirtual/Catalogos_y_documentos/190001/Toro-Equipment-.Equipos-de-Flotacion.pdf
56. Torrellas Hidalgo, R. (Agosto, 2013). La exposición al aluminio y su relación con el ambiente y la salud. *Revista de Tecnogestión*, 9(1). 3-11. Recuperado de <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/tecges/article/view/5646>
57. Torres Carranza, E. (s.f.). *Reutilización de aguas y lodos residuales*. Madrid, España: Autor. Recuperado de https://sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/2016-12-18_11-22-14138493.pdf
58. Vásquez Orozco, R. A. (2009). *Administración y planificación del presupuesto de un proyecto de urbanización*. (Tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. Recuperado de http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_3054_C.pdf

59. Veolia Water Technologies (2005). *Soluciones tecnológicas para tratamiento y valorización de lodos de depuradora. Catálogo de productos.* Madrid: Autor. Recuperado de <https://www.construmatica.com/archivos/28128/compania/compania.pdf>
60. Villegas Gallón, M. M. Y Vidal Tordecilla, E. E. (2009). *Gestión de los procesos de descontaminación de aguas residuales domesticas de tipo rural en Colombia.* (Tesis de licenciatura). Universidad de Antioquia, Colombia. Recuperado de <http://tesis.udea.edu.co/dspace/bitstream/10495/55/1/GestionProcesosDescontaminacion.pdf>
61. Villegas, J. D., Castaño, J. M. Y Paredes Cuervo, D. (Octubre, 2005). Recuperación de sulfato de aluminio a partir de lodos generados en plantas de potabilización de agua. *Scientia Et Technica*, 11(28), 223-228. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/849/84911707039.pdf>
62. Walter, A.; Samuel, W.; Peter, A. y Joseph, O. (January, 2011). Antibacterial activity of *Moringa oleifera* and *Moringa stenopetala* methanol and n-hexane seed extracts on bacteria implicated in water borne diseases. *African Journal of Microbiology Research*, 5(2), 153-157. Recovered from <https://academicjournals.org/journal/AJMR/article-full-text-pdf/394A53040085>

63. Wauquier, J. P. (1994). *El refino del petróleo. Petróleo crudo, productos petrolíferos, esquemas de fabricación*. Madrid, España. Ediciones Díaz de Santos. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/403262077/El-refino-del-petroleo-petroleo-crudo-productos-petroliferos-pdf>

APÉNDICES

Apéndice 1. Fase previa 10 repeticiones para caracterización del afluente de la planta de Tratamiento Santa Isabel II

FECHA	Hora	pH	RELACIÓN				SÓLIDOS					
			DQO	DBO ₅	DQO/DBO	TURB (NTU)	SS	SDT	SST	SUMA SDT+SST	STT	
14/3/2019	10:40	7.46	751	440	1.71	288	0.50	500	190	690	884	
15/3/2019	10:20	7.46	680	440	1.55	332	0.80	484	185	669	888	
19/3/2019	10:45	7.30	856	460	1.86	342	1.00	511	220	731	840	
21/3/2019	10:40	7.40	772	560	1.38	311	2.50	430	267	697	984	
22/3/2019	13:38	7.57	832	500	1.66	336	2.50	413	255	668	946	
27/3/2019	15:20	7.19	694	400	1.74	256	1.00	385	187	572	771	
29/3/2019	15:21	7.30	749	360	2.08	257	1.50	487	175	662	764	
02/4/2019	15:23	7.04	890	520	1.71	346	1.50	426	225	651	906	
04/4/2019	15:19	7.22	851	660	1.29	363	2.50	491	308	799	924	
05/4/2019	15:34	7.36	847	600	1.41	340	2.00	487	258	745	960	

Abreviaturas. (pH) unidades de pH, (DQO) demanda química de oxígeno en mg/L de O₂, (DBO) demanda bioquímica de oxígeno en mg/L de O₂, (TURB) turbiedad en Nephelometric Turbidity Unit por sus siglas en inglés, (SS) sólidos sedimentables en mL/L, (SDT) sólidos disueltos totales en mg/L, (SST) sólidos suspendidos totales en mg/L, (STT) sólidos totales en mg/L.

Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de AMSA (2019). *Manual de sistemas de análisis y procedimientos operativos para el monitoreo de plantas de tratamiento de AMSA versión 2019.*

Apéndice 2. **Muestra del afluente de la planta Santa Isabel II para la realización de la curvas de dosificación**

Parámetros	Especificaciones
No. Muestra	AMSA 190379
Caudal (L/s)	15
Fecha	25/04/2019
Hora recolecta	10:20 am
pH	7.48
Volumen tomado (L)	25

Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de AMSA (2019). *Manual de sistemas de análisis y procedimientos operativos para el monitoreo de plantas de tratamiento de AMSA versión 2019.*

Apéndice 3. **Muestras para la evaluación del tratamiento de aguas residuales con agentes floculantes**

ID AMSA	Cuerpo de agua	Hora
190380	Afluente	10:00 am
190381	Efluente	10:25 am
190380a	Afluente tratado con Clear Aqua	14:00 instalaciones del laboratorio
190380b	Afluente tratado con Ecoclean 2300	14:00 instalaciones del laboratorio

Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de AMSA (2019). *Manual de sistemas de análisis y procedimientos operativos para el monitoreo de plantas de tratamiento de AMSA versión 2019.*

Apéndice 4. **Inversión económica inicial en la implementación de una PTAR de tipo biológico secundario modular**

Instalación de módulos	Inversión inicial (Q)
Caudal de diseño	0.29 L/s
Obra civil	16 638
Fabricación de la planta (fibra de vidrio)	118 000
Maquinaria y Equipo	101 000
Montaje e instalación	5 500
Transporte módulos	4 000
Total	245 138

Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de Hernández Gramajo (2014). *Comparación de costos entre una planta de tratamiento de aguas residuales domesticas prefabricada y una construida en sitio.*

Apéndice 5. **Inversión económica inicial en la implementación de una PTAR de tipo biológico secundario construida en sitio**

Construcción en sitio	Inversión inicial (Q)
Caudal de diseño	0.29 L/s
Preliminares	16 638
Tratamiento primario	30 134
Tratamiento secundario	82 648
Digestor de lodos y patios de secado	8 298
Impermeabilización	16 030
Bombas e instalación eléctrica	8 500
Instalaciones	140 000
Total	301 948

Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de Hernández Gramajo (2014). *Comparación de costos entre una planta de tratamiento de aguas residuales domesticas prefabricada y una construida en sitio.*

Apéndice 6. **Inversión económica inicial en la implementación de un sistema de flotación por aire disuelto (SFAD) con agentes floculantes**

Equipamiento	Unidades	Costo unidad (Q)	Total (Q)
Sistema de flotación por aire disuelto con caudal de diseño 25 L/s	1	500 000	500 000
Contenedor con mallas (equipo de deshidratación) de 25 m ³ con gancho para ser remolcado	6	150 000	950 000
Cisterna de 15,000 L	2	16 000	32 000
Bomba de 1 HP	2	2 500	5 000
Instalación eléctrica	1	25 000	25 000
Caseta de control y almacenamiento de sólidos	1	25 000	25 000
Infraestructura y Caminamiento	1	25 000	25 000
Materiales y equipo para el sistema de tratamiento	1	15 000	15 000
Materiales y equipo para iniciar el cultivo		10 000	10 000
Preparación del terreno y abertura de agujeros para la siembra de las plántulas	1	5 000	5 000
Sistema de riego para una hectárea	1	15 000	15 000
Plántula aguacate Hass 1 ha cultivo muy intensivo de 2.50 x 2.50 m	1 600	10	16 000
Total			1 623 000

Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de Rodas Ruiz (2003). *Determinación del costo directo de construcción de una planta de tratamiento con la ayuda de la programación PERT-tiempo* y Hernández Gramajo (2014). *Comparación de costos entre una planta de tratamiento de aguas residuales domesticas prefabricada y una construida en sitio.*

**Apéndice 7. Inversión económica inicial en la implementación de la PTAR
Santa Isabel II en la actualidad**

Renglón	Costo (Q)
Caudal de diseño	25 L/s
Preliminares	2 525 585
Tratamiento primario	2 354 062
Tratamiento secundario	10 492 950
Digestor de lodos y patios de secado	1 250 274
Impermeabilización	1 105 514
Bombas y energía eléctrica	1 200 000
Instalaciones	9 655 146
Total	28 583 531

Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de Rodas Ruiz (2003). *Determinación del costo directo de construcción de una planta de tratamiento con la ayuda de la programación pert-tiempo* y Hernández Gramajo (2014). *Comparación de costos entre una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas prefabricada y una construida en sitio.*

Apéndice 8. **Proyección de precio del agua tratada por metro cúbico en la PTAR Santa Isabel II**

Descripción	Unidad	Cantidad	Valor (Q)	Total (Q)
Sueldo operativo	Horas	176	12.00	2 112
Prestaciones	Horas	176	5.00	887
Estudios AG 236-2006 efluente	Un	1	1 700	1 700
Implementos de limpieza	Global	1	275	275
Mantenimiento de bombas	Global	1	1 000	1 000
Energía eléctrica de bombas	Global	1	30 000	30 000
Manejo de lodos	Tonelada	5.50	545	3 000
Mantenimiento de tanques sedimentadores	Por unidad	4	500	2 000
Imprevistos (eléctricos, cambios, reparaciones)	Un	1	2 500	2 500
Total				43 474
Q. 43 474 de insumos dividido entre 38 880 m ³ tratados por mes				
Q. 1.12 / m³ de agua tratada				

Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de Rodas Ruiz (2003). *Determinación del costo directo de construcción de una planta de tratamiento con la ayuda de la programación PERT-tiempo* y Hernández Gramajo (2014). *Comparación de costos entre una planta de tratamiento de aguas residuales domesticas prefabricada y una construida en sitio.*

Apéndice 9. Proyección de precio del agua tratada por metro cúbico en la planta Santa Isabel II con el agente inorgánico Clear Aqua

Descripción	Unidad	Cantidad	Valor (Q)	Total (Q)
Sueldo operario	Horas	176	12.00	2 112
Prestaciones	Horas	176	5.00	887
Estudios AG 236-2006 efluente	Un	1	1 700	1 700
Agente floculante	Galón	1 360	200	411 400
Implementos de limpieza	Global	1	275	275
Mantenimiento de bombas	Global	1	1 000	1 000
Energía eléctrica de bombas	Global	1	30 000	30 000
Manejo de lodos	Tonelada	20	150	3 000
Mantenimiento de tanques sedimentadores	Por unidad	4	500	2 000
Imprevistos (eléctricos, cambios, reparaciones)	Un	1	2 500	2 500
Total				454 874
Q. 454 874 de insumos dividido 38 880 m ³ tratados por mes				
Q. 11.69 / m³ de agua tratada				

Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de Rodas Ruiz (2003). *Determinación del costo directo de construcción de una planta de tratamiento con la ayuda de la programación PERT-tiempo* y Hernández Gramajo (2014). *Comparación de costos entre una planta de tratamiento de aguas residuales domesticas prefabricada y una construida en sitio.*

Apéndice 10. **Proyección de precio del agua tratada por metro cúbico en la planta Santa Isabel II con el agente orgánico Ecoclean 2300**

Descripción	Unidad	Cantidad	Valor (Q)	Total (Q)
Sueldo operario	Horas	176	12.00	2 112
Prestaciones	Horas	176	5.00	887
Estudios AG 236-2006 efluente	Un	1	1 700	1 700
Agente floculante	Galón	1 361	300	1 234 051
Implementos de limpieza	Global	1	275	275
Mantenimiento de bombas	Global	1	1 000	1 000
Gasto energía eléctrica de bombas	Global	1	30 000	30 000
Manejo de lodos	Tonelada	19	158	3 000
Mantenimiento de tanques sedimentadores	Por unidad	4	500	2 000
Imprevistos (eléctricos, cambios, reparaciones)	Un	1	2 500	2 500
Total				1 277 525
Q. 1 277 525 de insumos dividido 38 880 m ³ tratados por mes				
Q. 32.86 / m³ de agua tratada				

Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de Rodas Ruiz (2003). *Determinación del costo directo de construcción de una planta de tratamiento con la ayuda de la programación PERT-tiempo* y Hernández Gramajo (2014). *Comparación de costos entre una planta de tratamiento de aguas residuales domesticas prefabricada y una construida en sitio.*

Apéndice 11. **Proyección de precio del agua tratada por metro cúbico con sistemas SFAD y el agente inorgánico Clear Aqua**

Descripción	Unidad	Cantidad	Valor (Q)	Total (Q)
Sueldo operario	Horas	176	12.00	2 112
Prestaciones	Horas	176	500	887
Estudios AG 236-2006 efluente	Un	1	1 700	1 700
Agente floculante	Galón	544	200	205 675
Implementos de limpieza	Global	1	275	275
Mantenimiento de bombas y sistema de riego	Global	1	1 000	1 000
Gasto energía para el funcionamiento, motor aireador y desnatadora, sistema de dosificación	Global	1	5 000	5 000
Manejo de lodos	Tonelada	20	150	3 000
Mantenimiento del sistema de flotación por aire disuelto	Por unidad	1	500	500
Imprevistos (eléctricos, cambios, reparaciones)	Un	1	1 000	1 000
Total				221 149
Q. 221 149 de insumos dividido 38 880 m ³ tratados por mes				
Q. 5.68 / m³ de agua tratada				

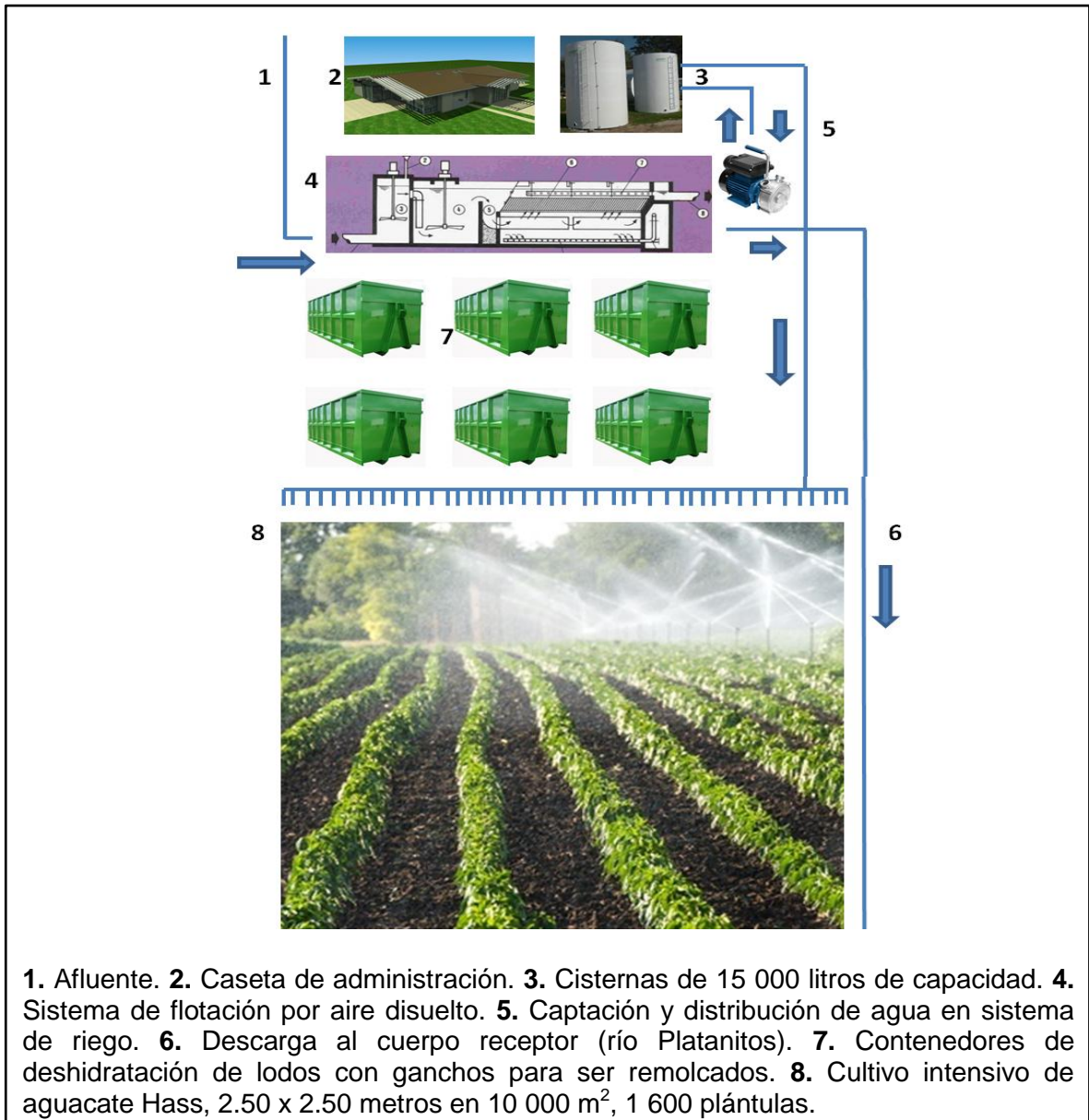
Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de Rodas Ruiz (2003). *Determinación del costo directo de construcción de una planta de tratamiento con la ayuda de la programación PERT-tiempo* y Hernández Gramajo (2014). *Comparación de costos entre una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas prefabricada y una construida en sitio.*

Apéndice 12. **Proyección de precio del agua tratada por metro cúbico con sistemas SFAD y el agente orgánico Ecoclean 2300**

Descripción	Unidad	Cantidad	Valor (Q)	Total (Q)
Sueldo operario	Horas	176	12.00	2 112
Prestaciones	Horas	176	5.00	887
Estudios AG 236-2006 efluente	Un	1	1 700	1 700
Agente floculante	Galón	816	300	308 318
Implementos de limpieza	Global	1	275	275
Mantenimiento de bombas y sistema de riego	Global	1	1 000	1 000
Gasto energía para el funcionamiento, motor aireador, desnatadora, sistema de dosificación	Global	1	5 000	5 000
Manejo de lodos	Tonelada	19	158	3 000
Mantenimiento de sistema de flotación por aire disuelto	Por unidad	1	500	500
Imprevistos (eléctricos, cambios, reparaciones)	Un	1	1 000	1 000
Total				323 792
Q. 323 792 de insumos dividido 38 880 m ³ tratados por mes				
Q. 8.32 / m³ de agua tratada				

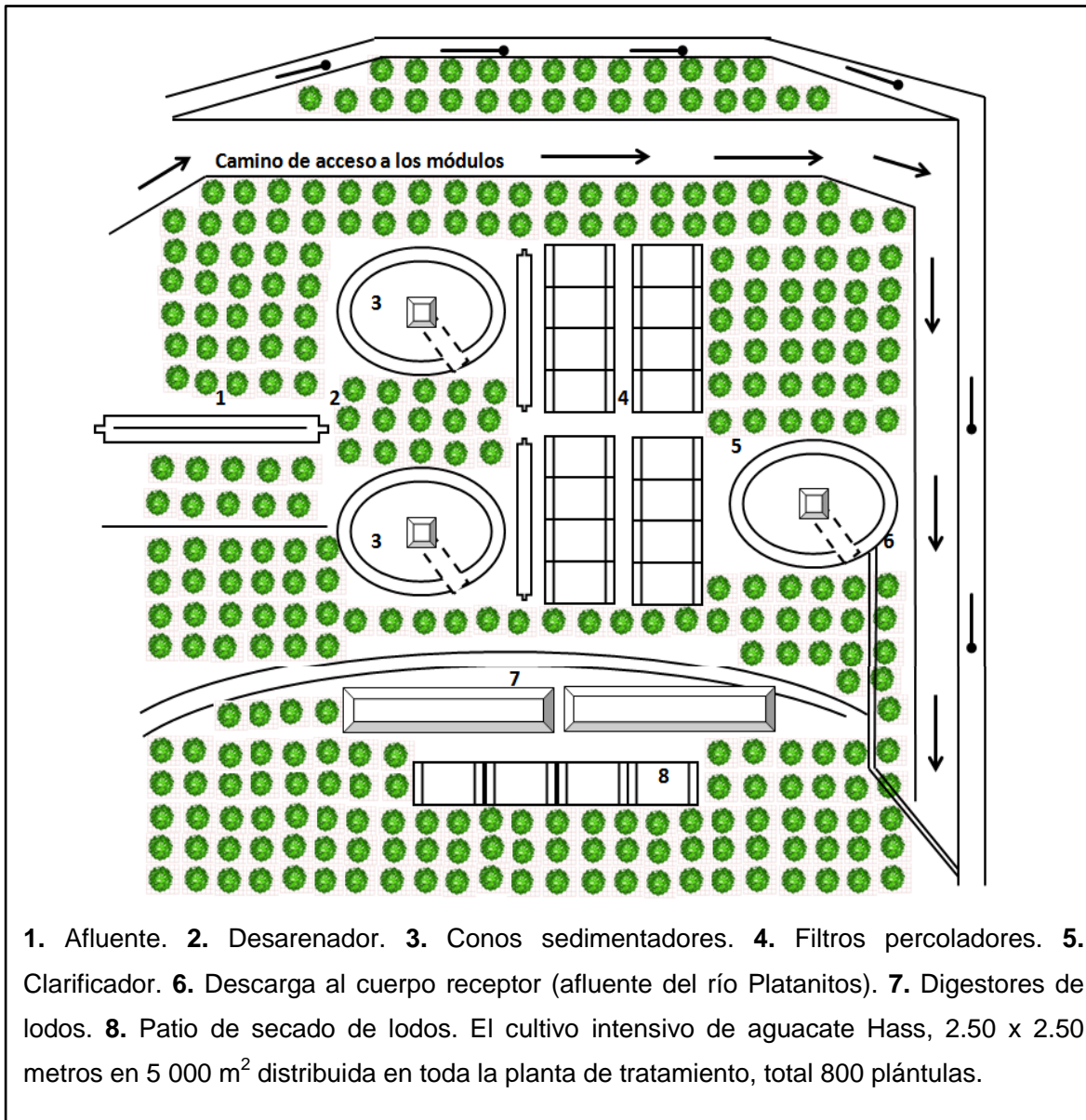
Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de Rodas Ruiz (2003). *Determinación del costo directo de construcción de una planta de tratamiento con la ayuda de la programación PERT-tiempo* y Hernández Gramajo (2014). *Comparación de costos entre una planta de tratamiento de aguas residuales domesticas prefabricada y una construida en sitio.*

Apéndice 13. **Proyección de una planta de tratamiento con flotación por aire disuelto, generación de lodos y sistemas agrícolas**



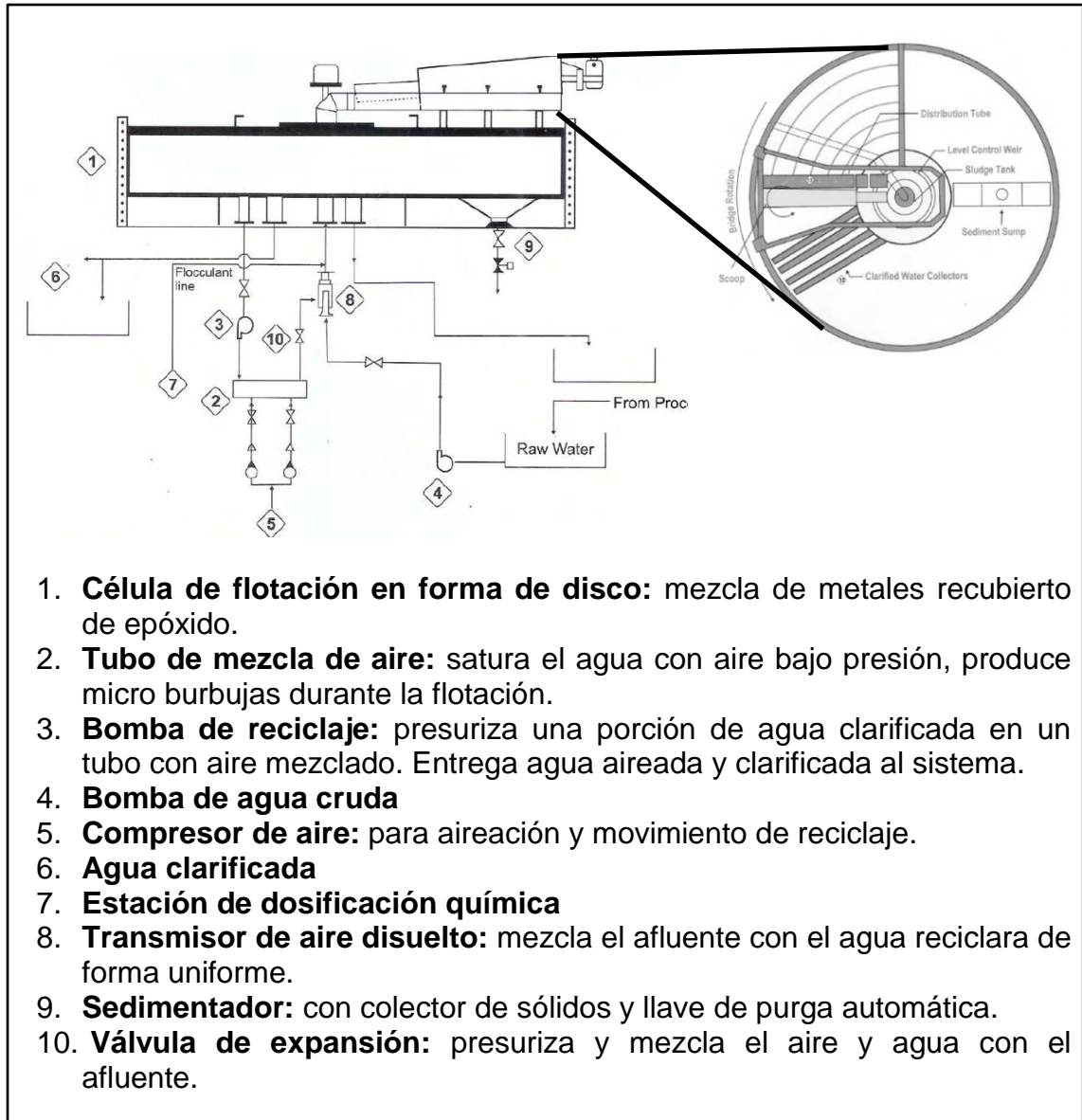
Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de Bartoli (2008). *Manual técnico del cultivo de aguacate has (Persea americana L.)*, y Daftech Engineers PVT. LTD, (2018). *Float cell. A cost effective dissolved clarifier backs by more than two decades of experience. Dissolved air flotation clarifier.*

Apéndice 14. **Proyección de la recuperación de espacios de la planta de tratamiento Santa Isabel II con sistemas de producción**



Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de AMSA (2019). *Estudio de diagnóstico y plan de plan de mejora de la planta Santa Isabel II, Informe final* y Bartoli (2008). *Manual técnico del cultivo de aguacate has (Persea americana L.)*.

Apéndice 15. Componentes de un flotador por aire disuelto



Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de Daftech Engineers PVT. LTD, (2018). *Float cell. A cost effective dissolved clarifier backs by more than two decades of experience.*

Dissolved air flotation clarifier.

Apéndice 16. **Especificaciones técnicas de un flotador por aire disuelto con un caudal de diseño de 25 L/s.**

Especificaciones técnicas	
Modelo	FRC - 90
Caudal nominal L/s	25
Dimensiones	
Altura máxima (m)	2.50
Diámetro (m)	4.50
Espacio necesario (m)	10 x 7
Espacio necesario (m ²)	70
Potencia instalada (kW)	15
Motor aireador (kW)	2.20
Desnatadora (kW)	0.55
Potencia requerida total (kW)	17.75
Aire disuelto en volumen de agua (m ³ /h)	30 - 35

Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de Toro Equipment (2009). *Anaconda, sistema de flotación por aire disuelto de alto rendimiento. Catálogo de productos y especificaciones técnicas.*