



**Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria  
(ERIS)**

**EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE MODELOS EXPERIMENTALES DE  
LECHO DE ROCA CALIZA Y LAGUNA FACULTATIVA, A ESCALA DE  
LABORATORIO, PARA EL AJUSTE DEL POTENCIAL DE HIDRÓGENO Y LA  
REMOCIÓN DE LA CARGA CONTAMINANTE DE LAS AGUAS MIELES DE  
UN BENEFICIO HÚMEDO TECNIFICADO DE CAFÉ**

**INGENIERA, BIANCA ILEANA ALAS FAJARDO  
INGENIERO, MARCO ANTONIO MORENO ALVARADO**

**Asesorados por el Dr. Ing. ADÁN POCASANGRE COLLAZOS**

**Guatemala, julio de 2013**

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE MODELOS EXPERIMENTALES DE  
LECHO DE ROCA CALIZA Y LAGUNA FACULTATIVA, A ESCALA DE  
LABORATORIO, PARA EL AJUSTE DEL POTENCIAL DE HIDRÓGENO Y LA  
REMOCIÓN DE LA CARGA CONTAMINANTE DE LAS AGUAS MIELES DE  
UN BENEFICIO HÚMEDO TECNIFICADO DE CAFÉ**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

**INGENIERA, BIANCA ILEANA ALAS FAJARDO**

**INGENIERO, MARCO ANTONIO MORENO ALVARADO**

**ASESORADOS POR EL Dr. Ing. ADÁN POCASANGRE COLLAZOS**

AL CONFERÍRSELES EL TÍTULO DE  
**MAESTRÍA (MAGISTER SCIENTIFICA) EN INGENIERÍA SANITARIA**

GUATEMALA, JULIO DE 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**HONORABLE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**DIRECTOR DE LA ESCUELA REGIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA Y  
RECURSOS HIDRÁULICOS**

M.Sc. Ing. Pedro Cipriano Saravia Celis

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

EXAMINADOR	M.Sc. Ing. Félix Douglas Aguilar Carrera
EXAMINADOR	M.Sc. Ing. Zenón Much Santos
EXAMINADOR	Dr. Ing. Adán Pocasangre Collazos

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

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

**EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE MODELOS EXPERIMENTALES DE  
LECHO DE ROCA CALIZA Y LAGUNA FACULTATIVA, A ESCALA DE  
LABORATORIO, PARA EL AJUSTE DEL POTENCIAL DE HIDRÓGENO Y LA  
REMOCIÓN DE LA CARGA CONTAMINANTE DE LAS AGUAS MIELES DE  
UN BENEFICIO HÚMEDO TECNIFICADO DE CAFÉ**

Tema que nos fuera asignado por la Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos ERIS, el 03 de septiembre del 2012.

---

**Inga. Bianca Ileana Alas Fajardo**

---

**Ing. Marco Antonio Moreno Alvarado**

Guatemala, 22 de julio de 2013

Ingeniero Pedro Saravía  
Director de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ing. Saravía:

Por este medio extiendo constancia a la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, de la Facultad de Ingeniería, que se ha realizado satisfactoriamente la revisión y corrección de estilo del trabajo de graduación de Maestría en Ingeniería Sanitaria: **EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE MODELOS EXPERIMENTALES DE LECHO DE ROCA CALIZA Y LAGUNA FACULTATIVA, A ESCALA DE LABORATORIO, PARA EL AJUSTE DEL POTENCIAL DE HIDRÓGENO Y LA REMOCIÓN DE LA CARGA CONTAMINANTE DE LAS AGUAS MIELES DE UN BENEFICIO HÚMEDO TECNIFICADO DE CAFÉ**, de los estudiantes ingenieros civiles:

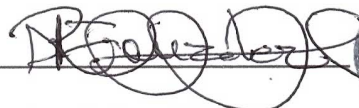
Bianca Ileana Alas Fajardo, número de carné: 100023970 y Marco Antonio Moreno Alvarado, número de carné: 100023971.

Para los requerimientos que su despacho necesite.

Atentamente,

*Rosa Amelia González Domínguez*  
LICENCIADA EN LETRAS  
Colegiado No. 5284

(f) y sello



Licda. Rosa Amelia González Domínguez  
Unidad de Lingüística  
Facultad de Ingeniería



UNIVERSIDAD SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

Guatemala, 24 de julio de 2013

Señores Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado  
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos

Respetuosamente les comunico que he revisado y aprobado, en mi calidad de Asesor y Coordinador de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Sanitaria, el documento de Estudio Especial titulado:

**EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE MODELOS EXPERIMENTALES DE LECHO DE ROCA CALIZA Y LAGUNA FACULTATIVA, A ESCALA DE LABORATORIO, PARA EL AJUSTE DEL POTENCIAL DE HIDRÓGENO Y LA REMOCIÓN DE LA CARGA CONTAMINANTE DE LAS AGUAS MIELES DE UN BENEFICIO HUMEDO TECNIFICADO DE CAFÉ**

Presentado por los estudiantes

Ingeniera, Bianca Ileana Alas Fajardo  
Ingeniero, Marco Antonio Moreno Alvarado

Les manifiesto que los estudiantes cumplieron en forma satisfactoria con todos los requisitos establecidos por la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos – ERIS – y por la Universidad de San Carlos de Guatemala en la realización de su estudio.

Agradeciéndoles de antemano la atención a la presente, se suscribe de ustedes,

Atentamente,

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

Dr. Ing. Adán E. Pocasangre Collazos  
Coordinador Maestría en Ciencias en Ingeniería Sanitaria

UNIVERSIDAD SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

Guatemala, 26 de julio de 2013

El director de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos – ERIS – después de conocer el dictamen del tribunal examinador integrado por los profesores siguientes: Dr. Ing. Adán Pocasangre Collazos, M.Sc. Ing. Zenón Much Santos, M.Sc. Félix Aguilar Carrera, así como el visto bueno del Coordinador de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Sanitaria; Dr. Ing. Adán Pocasangre Collazos y la revisión lingüística realizada por la Licenciada Rosa Amelia González Domínguez, Colegiada N° 5284, al trabajo de los estudiantes Ingeniera Bianca Ileana Alas Fajardo e Ingeniero Marco Antonio Moreno Alvarado, titulado **EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE MODELOS EXPERIMENTALES DE LECHO DE ROCA CALIZA Y LAGUNA FACULTATIVA, A ESCALA DE LABORATORIO, PARA EL AJUSTE DEL POTENCIAL DE HIDRÓGENO Y LA REMOCIÓN DE LA CARGA CONTAMINANTE DE LAS AGUAS MIELES DE UN BENEFICIO HUMEDO TECNIFICADO DE CAFÉ**. En representación de la Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado, procede a la autorización del mismo, en Guatemala a los 26 días del mes de julio de 2013.

IMPRIMASE

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

  
M.Sc. Ing. Pedro Cipriano Saravia Celis

DIRECTOR



## **ACTO QUE DEDICO A:**

**Dios todopoderoso**

Por permitirme alcanzar la meta de cursar mi maestría en Ingeniería Sanitaria y por protegerme a mí y a mis colegas hondureños durante nuestra estancia en Guatemala.

**Mis padres, Víctor Manuel y Breda Rosibel**

Por ser la brújula que me guía en donde sea que me encuentre y por ser un apoyo constante en todas las actividades que emprendo.

**Mis hermanos, Keila, Victoria, Víctor y Carlos**

Por todo el apoyo, compañía y cariño brindados; ustedes son los mejores hermanos del mundo entero.

**Mis cuñados, Ricardo y Fernando**

Por ser mis otros hermanos y por todos los consejos y el cariño brindado.

**Mis sobrinos, Valeria y Diego**

Por ser una alegría y bendición maravillosa en mi vida.



**Mis amigos Claudia,  
Mercedes y Marco**

Por todos las horas de compañía, los consejos, las risas y el apoyo brindado. Este logro no hubiera sido posible sin su ayuda.  
Marco, gracias por ser un estupendo compañero de tesis.

Bianca Ileana Alas Fajardo

## **ACTO QUE DEDICO A:**

**Mi madre María Elena**

Figura fundamental en mi vida, por marcar la pauta de un comportamiento de entrega, sacrificio y constancia.

**Mi hijo Diego**

Por tu paciencia y sacrificio. Sin entenderlo todo, esperaste siempre con amor mi regreso.

**Mi hermano Jorge Alejandro**

Por tu apoyo de hermano y amigo. Tu comportamiento a la altura de las circunstancias en todo momento.

**Mi hermana Gissell Alejandra**

En tu memoria mi querida hermana. Hasta siempre.

**Mi tía Gloria Moreno**

Por su ejemplo de amor y tenacidad. Pilar de la familia y ejemplo de una vida plena.

**Mis amigas Bianca, Claudia y Mercedes**

Por su amistad, el apoyo sin condición, su tiempo y la paciencia sin precedente alguno. Un abrazo siempre!

**Mis compañeros y amigos de  
oficina Karen, Ivis, Oscar,  
Mauricio, Olvin, Lis, Juan  
Carlos**

Por su apoyo y esfuerzo previo a cumplir  
esta meta.

Marco Antonio Moreno Alvarado

## **AGRADECIMIENTOS A:**

**Servicio Alemán de Intercambio Académico (DAAD)**

Por haber otorgado la beca para cursar los estudios de maestría en la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria, ERIS

**Servicio Autónomo Nacional de Acueductos y Alcantarillados de Honduras (SANAA)**

Por apoyar el crecimiento, la formación y el desarrollo del conocimiento científico mediante la capacitación continua y especializada de su personal técnico.

**Al personal docente y administrativo de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria (ERIS)**

Por toda la dedicación, apoyo y conocimientos brindados durante nuestra formación académica como Ingenieros sanitarios.

**Al personal del Laboratorio de Química y Microbiología Sanitaria**

Por toda la orientación y apoyo brindado durante la realización de los análisis de laboratorio efectuados en el presente estudio, de manera especial, al Sr. Moisés Dubón.

**La Asociación Nacional del Café (ANACAFÉ)**

Por toda la orientación y el apoyo logístico brindados durante la realización del presente estudio especial, de manera especial al Ing. Roberto Soto y a la Ing. Doris Vega.

**La cooperativa nuevo sendero**

Por permitarnos desarrollar nuestra investigación con las aguas residuales generadas en su beneficio húmedo tecnificado.

**Al Dr. Stewart Oakley**

Por ser un mentor y nuestro asesor honorario durante el desarrollo de nuestro estudio especial.

**Nuestros amigos y compañeros de la ERIS**

Por la amistad sincera, apoyo y compañerismo brindados durante el transcurso de nuestra maestría y por hacernos sentir como en casa. Sinceramente, ¡gracias!: Clara, Diego, Edgar, Edwin, Herber, Jennifer, Jorge, Juan, José, Mateo, Misael, Leda, Nancy, Nazir y Susam.

**Nuestros amigos del “refugio de Don Luis”**

Por todas las risas, consejos y complicidad, por ser como nuestra familia en Guatemala y por hacernos sentir como en casa. ¡Gracias!: Mercedes, Mauricio, Dina, Astrid, Juan, David H., Luis, Mariano, Henry, Mario y David B.

**La M.Sc. Ing. Claudia Cerrato Espinal**

Por la amistad y el apoyo incondicional brindado durante toda nuestra estadía en Guatemala, has sido un pilar para nosotros.

**Nuestros colegas  
becarios DAAD 2011,  
Oscar, Rommel y Marvin**

Por toda la orientación, apoyo y compañía  
brindados desde el inicio de nuestra estancia  
en Guatemala.

Bianca Ileana Alas Fajardo  
Marco Antonio Moreno Alvarado



## GLOSARIO

<b>Aforo</b>	Determinación del caudal que ingresa a una planta o unidad de tratamiento.
<b>Caudal</b>	Volumen de agua por unidad de tiempo.
<b>Cuerpo receptor</b>	Embalse natural, lago, laguna, río, quebrada, manantial, humedal, estuario, estero, manglar, pantano, aguas costeras y aguas subterráneas donde se descargan aguas residuales.
<b>Demanda bioquímica de oxígeno</b>	La medida indirecta del contenido de materia orgánica en aguas residuales, que se determina por la cantidad de oxígeno utilizado en la oxidación bioquímica de la materia orgánica biodegradable durante un período de cinco (5) días y una temperatura de 20 °C. Se representa como DBO <sub>5</sub> .
<b>Demanda química de oxígeno</b>	La medida indirecta del contenido de materia orgánica e inorgánica oxidable en aguas residuales, que se determina por la cantidad equivalente de oxígeno utilizando en la oxidación química. Se representa como DQO.



<b>Efluente</b>	Caudal de agua tratada que sale de una planta o unidad de tratamiento.
<b>Muestra</b>	La parte representativa, a analizar del agua residual o agua para reuso.
<b>Carga contaminante</b>	El resultado de multiplicar el caudal por la concentración de un contaminante determinados en un efluente y expresada en kilogramos por día.
<b>Pruebas batch</b>	Pruebas para la evaluación del funcionamiento de un modelo experimental aislado y en estado discontinuo.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	IX
RESUMEN .....	XXI
ASPECTOS GENERALES.....	XXIII
INTRODUCCIÓN .....	XXIII
OBJETIVOS.....	XXV
ANTECEDENTES.....	XXVII
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XXIX
JUSTIFICACIÓN.....	XXXI
ALCANCE .....	XXXIII
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. Las aguas residuales.....	1
1.1.1. Características y caracterización de las aguas residuales .....	1
1.1.2. Clasificación de las aguas residuales .....	2
1.2. Las aguas mieles.....	2
1.2.1. El procesamiento del café en un beneficio húmedo tecnificado.....	3
1.2.1.1. Recibimiento y clasificación del fruto ...	3
1.2.1.2. Remoción de la pulpa del fruto maduro .....	4
1.2.1.3. Eliminación de la miel o mucílago.....	4
1.2.1.4. Lavado del grano de café .....	5
1.2.1.5. Secado del café lavado .....	5

1.2.2.	Breve descripción de la proceso de generación de las aguas mieles en el beneficio húmedo tecnificado Nuevo sendero .....	6
1.2.3.	Manejo actual de las aguas mieles en el beneficio húmedo tecnificado Nuevo sendero .....	8
1.3.	Ajuste del potencial de hidrógeno mediante lechos de contacto de roca caliza.....	9
1.3.1.	Fundamentos .....	10
1.3.2.	Método de ajuste de potencial de hidrógeno mediante lechos de roca caliza .....	11
1.4.	Tratamiento biológico de las aguas mieles .....	12
1.4.1.	Procesos biológicos unitarios .....	13
1.4.1.1.	Objetivo del tratamiento biológico .....	13
1.4.2.	Relación nutrición bacteriana y los procesos biológicos de tratamiento.....	13
1.4.3.	Procesos biológicos para el tratamiento de aguas residuales .....	14
1.4.4.	Lagunas de estabilización como sistemas de tratamiento de aguas residuales .....	15
1.4.4.1.	Sobre los criterios de dimensionamiento de lagunas de estabilización.....	16
1.4.4.2.	Modelos para lagunas facultativas a escala de laboratorio .....	17
1.4.4.3.	Método de radiación solar, para la determinación de la carga orgánica superficial .....	20
1.4.4.4.	Dimensionamiento de una laguna facultativa .....	21

2.	METODOLOGÍA.....	23
2.1.	Delimitación del campo de estudio .....	23
2.2.	Métodos analíticos.....	24
2.3.	Análisis estadístico para determinar el número de muestras ..	32
2.4.	Caracterización de las aguas utilizadas en el procesamiento del café .....	33
2.4.1.	Parámetros físico-químico seleccionados para la caracterización.....	34
2.4.2.	Puntos de recolección de muestras .....	37
2.4.3.	Frecuencia del análisis de muestras.....	38
2.4.4.	Toma de muestras.....	38
2.4.4.1.	Agua para lavado y despulpado del café.....	39
2.4.4.2.	Agua miel generada durante el lavado y despulpado del café .....	40
2.4.4.3.	Agua miel tratada con hidróxido de calcio .....	41
2.5.	Propuestas de tratamiento evaluadas .....	42
2.5.1.	Ajuste del potencial de hidrógeno del agua miel mediante lechos de contacto de roca caliza .....	42
2.5.1.1.	Construcción y montaje del modelo experimental para el ajuste del potencial de hidrógeno .....	44
2.5.1.2.	Determinación del potencial de hidrógeno del agua miel previo al proceso de ajuste .....	47

2.5.1.3.	Determinación de la altura del medio de roca caliza y la carga hidráulica del modelo.....	47
2.5.1.4.	Inicio de operaciones del modelo de ajuste del potencial de hidrógeno y toma de muestras del efluente .....	48
2.5.1.5.	Parámetros de control seleccionados.....	48
2.5.1.6.	Construcción del gráfico: carga hidráulica disponible versus potencial de hidrógeno .....	49
2.5.2.	Tratamiento biológico mediante el uso de un modelo de laguna facultativa a escala de laboratorio .....	50
2.5.2.1.	Diseño y construcción del modelo biológico .....	52
2.5.2.2.	Parámetros de control seleccionados.....	54
3.	RESULTADOS EXPERIMENTALES .....	57
3.1.	Medición de caudal .....	57
3.1.1.	Estructura y procedimiento de medición del caudal por el método volumétrico.....	57
3.2.	Caracterización de las aguas utilizadas en el procesamiento del café.....	58
3.2.1.	Agua para lavado y despulpado del café.....	58
3.2.2.	Agua residual generada durante el lavado y despulpado del fruto del café (agua miel cruda).....	60
3.2.3.	Agua miel tratada con hidróxido de calcio .....	62

3.3.	Valoraciones sobre la eficiencia del tratamiento actual .....	63
3.4.	Propuestas de tratamiento evaluadas .....	64
3.4.1.	Ajuste del potencial de hidrógeno mediante el modelo de lecho de contacto de roca caliza .....	64
3.4.2.	Tratamiento biológico mediante el uso del modelo de laguna facultativa a escala de laboratorio .....	69
4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	71
4.1.	Caracterización de las aguas utilizadas en el procesamiento del café .....	71
4.1.1.	Agua para lavado y despulpado del café .....	71
4.1.2.	Agua residual generada durante el lavado y despulpado del fruto del café (agua miel cruda) .....	82
4.1.3.	Agua miel tratada con hidróxido de calcio .....	93
4.2.	Valoraciones sobre la eficiencia del tratamiento actual .....	104
4.3.	Análisis estadístico de los datos de producción .....	109
4.3.1.	Datos de producción de la cosecha 2012-2013.....	109
4.4.	Propuestas de tratamiento evaluadas .....	116
4.4.1.	Ajuste del potencial de hidrógeno del agua miel mediante un modelo de lecho de roca caliza .....	117
4.4.1.1.	Primer modelo experimental de ajuste de pH .....	117
4.4.1.2.	Segundo modelo experimental de ajuste de pH .....	117
4.4.1.3.	Tercer modelo experimental de ajuste de pH .....	119
4.4.1.4.	Cuarto modelo experimental de ajuste de pH .....	121

4.4.2.	Tratamiento biológico mediante el uso del modelo de laguna facultativa a escala de laboratorio .....	124
4.4.2.1.	Primer modelo experimental.....	124
4.4.2.2.	Segundo modelo experimental.....	140
4.4.2.3.	Tercer modelo experimental.....	156
4.4.2.4.	Cuarto modelo experimental .....	171
4.4.2.5.	Quinto modelo experimental.....	182
5.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	195
5.1.	Caracterización del agua para el lavado y despulpado del café .....	195
5.2.	Caracterización del agua residual generada durante el lavado y despulpado del café.....	197
5.3.	Valoraciones sobre el tratamiento actual .....	198
5.4.	Análisis estadístico de los datos de producción .....	199
5.5.	Propuestas de tratamiento evaluadas .....	200
5.5.1.	Ajuste del potencial de hidrógeno mediante un modelo de lecho de contacto de roca caliza.....	200
5.5.1.1.	Primer modelo experimental de ajuste de pH .....	200
5.5.1.2.	Segundo modelo experimental de ajuste de pH .....	201
5.5.1.3.	Tercer modelo experimental de ajuste de pH .....	201
5.5.1.4.	Cuarto modelo experimental de ajuste de pH .....	201
5.5.1.5.	Resumen de resultados obtenidos para todos los modelos experimentales de ajuste de pH.....	202

5.5.2.	Tratamiento biológico en un modelo de laguna facultativa a escala de laboratorio .....	203
5.5.2.1.	Primer modelo experimental .....	203
5.5.2.2.	Segundo modelo experimental .....	204
5.5.2.3.	Tercer modelo experimental .....	204
5.5.2.4.	Cuarto modelo experimental.....	205
5.5.2.5.	Quinto modelo experimental .....	205
5.5.2.6.	Resumen de la eficiencia de remoción de carga orgánica de los modelos evaluados.....	206
CONCLUSIONES .....		207
RECOMENDACIONES .....		209
BIBLIOGRAFÍA.....		211
ANEXOS .....		214





## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	El procesamiento del fruto del café .....	5
2.	Usos del agua durante el procesamiento del fruto del café .....	7
3.	Proceso del beneficiado húmedo del café .....	8
4.	Esquema del metabolismo bacteriano quimioheterótrofo .....	14
5.	Diagrama simplificado de comensalismo de algas y bacterias en el ciclo del carbono .....	19
6.	Esquema de una laguna facultativa .....	20
7.	Ubicación del beneficio de la cooperativa Nuevo Sendero .....	23
8.	Trayecto desde el beneficio Nuevo Sendero hasta el laboratorio de química y microbiología sanitaria Alba Tabarini Molina .....	24
9.	Número aproximado de muestras necesario para calcular una concentración media .....	33
10.	Esquema de puntos de recolección de muestras .....	37
11.	Diagrama de flujo de las actividades de un proceso de ajuste del potencial de hidrógeno.....	43
12.	Esquema del montaje del lecho de roca caliza .....	46
13.	Ejemplo de gráfico de relación entre carga hidráulica versus pH, para una altura de lecho determinada .....	49
14.	Esquema del canal utilizado como modelo lagunar a escala de laboratorio .....	50
15.	Diagrama de flujo de las actividades del tratamiento biológico.....	51
16.	Carga hidráulica y pH para lechos de roca caliza de 1,00 m .....	66
17.	Carga hidráulica y pH para lechos de roca caliza de 1,50 m .....	67

18.	Potencial de hidrógeno vrs. Carga hidráulica admisible en la columna de ajuste de potencial de hidrógeno .....	68
19.	Oxígeno disuelto del agua para lavado y despulpado del café.....	72
20.	Conductividad eléctrica, agua lavado y despulpado del café .....	73
21.	Sólidos disueltos totales, agua lavado y despulpado del café .....	73
22.	Turbiedad del agua para lavado y despulpado del café .....	74
23.	Color en el agua para lavado y despulpado del café .....	74
24.	Potencial de hidrógeno, agua para lavado y despulpado de café .....	75
25.	Nitratos en el agua para lavado y despulpado del café .....	76
26.	Nitritos en el agua para lavado y despulpado del café .....	76
27.	Fosfatos en el agua para el lavado y despulpado del café .....	77
28.	Hierro en el agua para el lavado y el despulpado del café .....	77
29.	Manganeso en el agua para el lavado y despulpado del café .....	78
30.	Alcalinidad del agua para el lavado y el despulpado del café.....	79
31.	Cloruros en el agua para lavado y despulpado del café .....	79
32.	Dureza en el agua para el lavado y despulpado del café .....	80
33.	Coliformes totales en el agua para lavado y despulpado del café .....	81
34.	Coliformes fecales en el agua para lavado y despulpado del café ....	81
35.	Oxígeno disuelto, agua miel cruda .....	83
36.	Potencial de hidrógeno, agua miel cruda.....	83
37.	Temperatura del agua miel cruda .....	84
38.	DQO, agua miel cruda .....	85
39.	Valores de DBO <sub>5</sub> .....	86
40.	Índice de biodegradabilidad DBO <sub>5</sub> /DQO.....	87
41.	Sólidos suspendidos, agua miel cruda .....	88
42.	Sólidos totales, agua miel cruda.....	89
43.	Sólidos fijos y volátiles, agua miel cruda .....	89
44.	NO <sub>3</sub> , agua miel cruda .....	91
45.	NO <sub>2</sub> , agua miel cruda .....	91

46.	NH <sub>3</sub> , agua miel cruda.....	92
47.	PO <sub>4</sub> , agua miel cruda.....	92
48.	Oxígeno disuelto, agua miel con hidróxido de calcio .....	94
49.	pH agua miel con hidróxido de calcio .....	94
50.	DQO agua miel con hidróxido de calcio.....	95
51.	DBO <sub>5</sub> , agua miel con hidróxido de calcio .....	96
52.	Relación DBO <sub>5</sub> /DQO agua miel con hidróxido de calcio .....	97
53.	Sólidos Suspendidos, agua miel con hidróxido de calcio.....	98
54.	Sólidos totales, agua miel con hidróxido de calcio.....	99
55.	Sólidos fijos y volátiles, agua miel con hidróxido de calcio .....	100
56.	NO <sub>3</sub> , agua miel con hidróxido de calcio .....	102
57.	NO <sub>2</sub> , agua miel con hidróxido de calcio .....	103
58.	NH <sub>3</sub> , agua miel con hidróxido de calcio.....	103
59.	PO <sub>4</sub> , agua miel con hidróxido de calcio.....	104
60.	Sólidos suspendidos, agua miel cruda y agua miel con hidróxido de calcio.....	105
61.	Comportamiento del potencial de hidrógeno, agua miel cruda y agua miel con hidróxido de calcio .....	106
62.	DBO <sub>5</sub> del agua miel cruda y el agua miel con hidróxido de calcio ..	107
63.	DQO del agua miel cruda y el agua miel con hidróxido de calcio ...	109
64.	Análisis de frecuencia para la producción de la cosecha.....	114
65.	Análisis de la frecuencia para el consumo de agua durante la cosecha 2012 – 2013.....	116
66.	Variación de la DBO <sub>5</sub> en el primer modelo experimental .....	128
67.	Variación de la DBO <sub>5</sub> en la descarga de agua miel del primer modelo experimental.....	129
68.	Variación de la DBO <sub>5</sub> en la muestra tomada el 16-abril-2012.....	131
69.	Variación de la DBO <sub>5</sub> en la muestra tomada el 18-abril-2012.....	132
70.	Variación de la DBO <sub>5</sub> en la muestra tomada el 22-abril-2012.....	133

71.	Variación de la DBO <sub>5</sub> en la muestra tomada el 23-abril-2012 .....	134
72.	DBO <sub>5</sub> monitoreado durante el período de muestreo.....	136
73.	DBO <sub>5</sub> remanente para el período de muestreo .....	136
74.	Eficiencia de remoción de DBO <sub>5</sub> de la unidad de tratamiento .....	137
75.	Relación del oxígeno disuelto con la eficiencia de remoción de DBO <sub>5</sub> en la unidad de tratamiento .....	139
76.	Variación de la DBO <sub>5</sub> en el segundo modelo experimental .....	143
77.	Variación de la DBO <sub>5</sub> en la descarga de agua miel del segundo modelo experimental .....	144
78.	Variación de la DBO <sub>5</sub> en la muestra tomada el 23-abril-2012 .....	146
79.	Variación de la DBO <sub>5</sub> en la muestra tomada el 24-abril-2012 .....	147
80.	Variación de la DBO <sub>5</sub> en la muestra tomada el 25-abril-2012 .....	148
81.	Variación de la DBO <sub>5</sub> en la muestra tomada el 26-abril-2012 .....	149
82.	Variación de la DBO <sub>5</sub> en la muestra tomada el 29-abril-2012 .....	150
83.	Variación de la DBO <sub>5</sub> en la muestra tomada el 30-abril-2012 .....	151
84.	Variación de la DBO <sub>5</sub> en la muestra tomada el 02-mayo-2012 .....	152
85.	Variación de la DBO <sub>5</sub> en la muestra tomada el 06-mayo-2012 .....	153
86.	DBO <sub>5</sub> monitoreado durante el período de muestreo.....	155
87.	DBO <sub>5</sub> remanente para el período de muestreo .....	155
88.	Eficiencia de remoción de DBO <sub>5</sub> de la unidad de tratamiento .....	156
89.	Variación de la DBO <sub>5</sub> en el tercer modelo experimental.....	159
90.	Variación de la DBO <sub>5</sub> en la muestra tomada el 26-abril-2012 .....	161
91.	Variación de la DBO <sub>5</sub> en la muestra tomada el 29-abril-2012 .....	162
92.	Variación de la DBO <sub>5</sub> en la muestra tomada el 30-abril-2012 .....	163
93.	Variación de la DBO <sub>5</sub> en la muestra tomada el 02-mayo-2012 .....	164
94.	Variación de la DBO <sub>5</sub> en la muestra tomada el 06-mayo-2012 .....	165
95.	DBO <sub>5</sub> monitoreado durante el período de muestreo.....	167
96.	DBO <sub>5</sub> remanente para el período de muestreo .....	167
97.	Eficiencia de remoción de DBO <sub>5</sub> de la unidad de tratamiento .....	168

98.	Relación del oxígeno disuelto con la eficiencia de remoción de DBO <sub>5</sub> en la unidad de tratamiento .....	171
99.	Variación de la DBO <sub>5</sub> en la muestra tomada el 07-mayo-2012.....	175
100.	Variación de la DBO <sub>5</sub> en la muestra tomada el 08-mayo-2012.....	176
101.	Variación de la DBO <sub>5</sub> en la muestra tomada el 09-mayo-2012.....	177
102.	DBO <sub>5</sub> monitoreado durante el período de muestreo .....	178
103.	DBO <sub>5</sub> remanente para el período de muestreo .....	179
104.	Eficiencia de remoción de DBO <sub>5</sub> de la unidad de tratamiento.....	179
105.	Relación del oxígeno disuelto con la eficiencia de remoción de DBO <sub>5</sub> en la unidad de tratamiento .....	182
106.	Variación de la DBO <sub>5</sub> en la muestra tomada el 07-mayo-2012.....	186
107.	Variación de la DBO <sub>5</sub> en la muestra tomada el 08-mayo-2012.....	187
108.	Variación de la DBO <sub>5</sub> en la muestra tomada el 09-mayo-2012.....	188
109.	DBO <sub>5</sub> monitoreado durante el período de muestreo .....	189
110.	DBO <sub>5</sub> remanente para el período de muestreo .....	190
111.	Eficiencia de remoción de DBO <sub>5</sub> de la unidad de tratamiento.....	190
112.	Relación del oxígeno disuelto con la eficiencia de remoción de DBO <sub>5</sub> en la unidad de tratamiento .....	193

## TABLAS

I.	Clasificación de las lagunas con base en la presencia y fuentes de oxígeno .....	16
II.	Parámetros de análisis seleccionados para la caracterización .....	34
III.	Resumen de cálculo de caudal de bombeo .....	58
IV.	Características físicas, agua para lavado y despulpado del café ....	59
V.	Contenido de nutrientes, agua para lavado y despulpado del café.	59
VI.	Características químicas, agua para el lavado y despulpado del café .....	60

VII.	Características bacteriológicas, agua para el lavado y despulpado del café .....	60
VIII.	Características físicas, agua miel cruda .....	61
IX.	Contenido de nutrientes, agua miel cruda .....	61
X.	Características químicas, agua miel cruda .....	62
XI.	Características físicas, agua miel tratada con hidróxido de calcio ...	62
XII.	Contenido de nutrientes, agua miel tratada con hidróxido de calcio.....	63
XIII.	Características químicas, agua miel tratada con hidróxido de calcio.....	63
XIV.	Eficiencias de remoción obtenidas en el tratamiento actual .....	64
XV.	Carga hidráulica y potencial de hidrógeno para diferentes alturas de lecho de roca caliza .....	65
XVI.	Carga hidráulica y pH para lechos de roca caliza de 1,00 m .....	66
XVII.	Carga hidráulica y pH para lechos de roca caliza de 1,50 m .....	67
XVIII.	Carga hidráulica admisible para pH = 6,2 en los lechos de roca caliza.....	69
XIX.	Resumen de eficiencia de remoción de carga orgánica de las evaluaciones del modelo de laguna facultativa.....	70
XX.	Características físicas, agua para lavado y despulpado del café.....	71
XXI.	Otros criterios de calidad, agua para lavado y despulpado del café .....	72
XXII.	Nutrientes en el agua para el lavado y despulpado del café.....	75
XXIII.	Propiedades químicas del agua para lavado y despulpado del café .....	78
XXIV.	Análisis bacteriológico mediante la prueba de tubos de fermentación múltiple .....	80
XXV.	Datos de OD, temperatura y pH del agua miel cruda .....	82
XXVI.	Valores de DQO del agua miel cruda .....	84

XXVII.	Valores de DBO <sub>5</sub> .....	85
XXVIII.	Índice de biodegradabilidad DBO <sub>5</sub> /DQO .....	86
XXIX.	Datos de sólidos sedimentables y suspendidos .....	87
XXX.	Datos de sólidos; ST, SF, SV. Agua miel cruda .....	88
XXXI.	Alcalinidad y acidez del agua miel cruda (mg/l CaCO <sub>3</sub> ) .....	90
XXXII.	Nutrientes en el agua miel cruda.....	90
XXXIII.	Datos de OD y pH, agua miel con hidróxido de calcio .....	93
XXXIV.	DQO, agua miel con hidróxido de calcio .....	95
XXXV.	DBO <sub>5</sub> agua miel con hidróxido de calcio .....	96
XXXVI.	Coeficiente de biodegradabilidad, agua miel con hidróxido de calcio.....	97
XXXVII.	Sólidos, agua miel con hidróxido de calcio.....	98
XXXVIII.	Sólidos totales agua miel con hidróxido de calcio .....	99
XXXIX.	Sólidos fijos y volátiles, agua miel con hidróxido de calcio.....	100
XL.	Alcalinidad, agua miel con hidróxido de calcio .....	101
XLI.	Acidez, agua miel con hidróxido de calcio.....	101
XLII.	NO <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> , NH <sub>3</sub> y PO <sub>4</sub> , agua miel con hidróxido de calcio .....	102
XLIII.	Sólidos suspendidos remanentes, agua miel con hidróxido de calcio.....	105
XLIV.	pH, agua miel cruda y agua miel con hidróxido de calcio.....	106
XLV.	DBO <sub>5</sub> remanente entre el agua miel cruda y agua miel con hidróxido de calcio.....	107
XLVI.	DQO remanente entre el agua miel cruda y el agua miel con hidróxido de calcio.....	108
XLVII.	Datos de producción durante el 2012.....	110
XLVIII.	Datos de producción durante el 2013.....	111
XLIX.	Resumen de datos de producción cosecha 2012-2013 .....	112
L.	Datos relevantes de la producción de la cosecha 2012 - 2013.....	112
LI.	Análisis de frecuencia para la producción cosecha 2012-2013.....	113



LII.	Análisis de frecuencia para el consumo de agua de la cosecha 2012 - 2013.....	115
LIII.	Variación del potencial de hidrógeno para el primer modelo experimental de ajuste de pH .....	117
LIV.	Variación del potencial de hidrógeno para el segundo modelo experimental de ajuste de pH .....	118
LV.	Cálculo de la carga hidráulica para la prueba # 1 .....	118
LVI.	Cálculo de la carga hidráulica para la prueba # 2 .....	119
LVII.	Variación del potencial de hidrógeno para el tercer modelo experimental de ajuste de pH .....	119
LVIII.	Cálculo de la carga hidráulica para la prueba # 1 .....	120
LIX.	Cálculo de la carga hidráulica para la prueba # 2 .....	120
LX.	Cálculo de la carga hidráulica para la prueba # 3 .....	120
LXI.	Cálculo de la carga hidráulica para la prueba # 4 .....	121
LXII.	Cálculo de la carga hidráulica para la prueba # 5 .....	121
LXIII.	Variación del potencial de hidrógeno para el cuarto modelo experimental de ajuste de pH .....	122
LXIV.	Cálculo de la carga hidráulica para la prueba # 1 .....	122
LXV.	Cálculo de la carga hidráulica para la prueba # 2 .....	123
LXVI.	Cálculo de la carga hidráulica para la prueba # 3 .....	123
LXVII.	Cálculo de la carga hidráulica para la prueba # 4 .....	123
LXVIII.	Cálculo de la carga hidráulica para la prueba # 5 .....	124
LXIX.	Datos de partida para el diseño del primer modelo experimental mediante el método de carga máxima por radiación solar.....	124
LXX.	Descarga de agua miel a aplicar al primer modelo experimental ..	126
LXXI.	Monitoreo del oxígeno disuelto para cálculo de la DBO <sub>5</sub> .....	127
LXXII.	Variación de la DBO <sub>5</sub> en el primer modelo experimental .....	128
LXXIII.	Variación de la DBO <sub>5</sub> en la descarga de agua miel .....	129
LXXIV.	Variación de la DBO <sub>5</sub> para la muestra del 16-abril-2012.....	130

LXXV.	Variación de la DBO <sub>5</sub> para la muestra del 18-abril-2012.....	131
LXXVI.	Variación de la DBO <sub>5</sub> para la muestra del 22-abril-2012.....	132
LXXVII.	Variación de la DBO <sub>5</sub> para la muestra del 23-abril-2012.....	133
LXXVIII.	Cálculo de la DBO <sub>5</sub> para el período de muestreo.....	135
LXXIX.	Eficiencia de remoción de DBO <sub>5</sub> de la unidad de tratamiento.....	135
LXXX.	Máxima eficiencia esperada, primer modelo experimental.....	137
LXXXI.	Otros parámetros, primer modelo experimental .....	138
LXXXII.	Coeficientes de correlación lineal entre los parámetros monitoreados y la eficiencia de remoción de DBO <sub>5</sub> de la unidad de tratamiento .....	139
LXXXIII.	Datos de partida para el diseño del segundo modelo experimental mediante el método de carga máxima por radiación solar .....	140
LXXXIV.	Descarga de agua miel a aplicar al segundo modelo experimental.....	141
LXXXV.	Monitoreo del oxígeno disuelto para cálculo de la DBO <sub>5</sub> .....	141
LXXXVI.	Variación de la DBO <sub>5</sub> en el segundo modelo experimental.....	143
LXXXVII.	Variación de la DBO <sub>5</sub> en la descarga de agua miel.....	144
LXXXVIII.	Variación de la DBO <sub>5</sub> para la muestra del 23-abril-2012.....	145
LXXXIX.	Variación de la DBO <sub>5</sub> para la muestra del 24-abril-2012.....	146
XC.	Variación de la DBO <sub>5</sub> para la muestra del 25-abril-2012.....	147
XCI.	Variación de la DBO <sub>5</sub> para la muestra del 26-abril-2012.....	148
XCII.	Variación de la DBO <sub>5</sub> para la muestra del 29-abril-2012.....	149
XCIII.	Variación de la DBO <sub>5</sub> para la muestra del 30-abril-2012.....	150
XCIV.	Variación de la DBO <sub>5</sub> para la muestra del 02-mayo-2012.....	151
XCV.	Variación de la DBO <sub>5</sub> para la muestra del 06-mayo-2012.....	152
XCVI.	Cálculo de la DBO <sub>5</sub> para el período de muestreo.....	154
XCVII.	Eficiencia de remoción de DBO <sub>5</sub> de la unidad de tratamiento.....	154

XCVIII.	Datos de partida para el diseño del tercer modelo experimental mediante el método de carga máxima por radiación solar.....	156
XCIX.	Descarga de agua miel a aplicar al primer modelo experimental ..	157
C.	Monitoreo del oxígeno disuelto para cálculo de la DBO <sub>5</sub> .....	158
CI.	Variación de la DBO <sub>5</sub> en el tercer modelo experimental .....	159
CII.	Variación de la DBO <sub>5</sub> para la muestra del 26-abril-2012.....	160
CIII.	Variación de la DBO <sub>5</sub> para la muestra del 29-abril-2012.....	161
CIV.	Variación de la DBO <sub>5</sub> para la muestra del 30-abril-2012.....	162
CV.	Variación de la DBO <sub>5</sub> para la muestra del 02-mayo-2012.....	163
CVI.	Variación de la DBO <sub>5</sub> para la muestra del 06-mayo-2012.....	164
CVII.	Cálculo de la DBO <sub>5</sub> para el período de muestreo .....	166
CVIII.	Eficiencia de remoción de DBO <sub>5</sub> de la unidad de tratamiento.....	166
CIX.	Eficiencia del 70% esperada, tercer modelo experimental .....	168
CX.	Otros parámetros, tercer modelo experimental.....	169
CXI.	Coeficientes de correlación lineal entre los parámetros monitoreados y la eficiencia de remoción de DBO <sub>5</sub> de la unidad de tratamiento .....	170
CXII.	Datos de partida para el diseño del cuarto modelo experimental mediante el método de carga máxima por radiación solar.....	171
CXIII.	Descarga de agua miel a aplicar al cuarto modelo experimental...	172
CXIV.	Monitoreo del oxígeno disuelto para cálculo de la DBO <sub>5</sub> .....	173
CXV.	Variación de la DBO <sub>5</sub> para la muestra del 07-mayo-2012.....	174
CXVI.	Variación de la DBO <sub>5</sub> para la muestra del 08-mayo-2012.....	175
CXVII.	Variación de la DBO <sub>5</sub> para la muestra del 09-mayo-2012.....	176
CXVIII.	Cálculo de la DBO <sub>5</sub> para el período de muestreo .....	177
CXIX.	Eficiencia de remoción de DBO <sub>5</sub> de la unidad de tratamiento.....	178
CXX.	Eficiencia del 70 % esperada, cuarto modelo experimental.....	180
CXXI.	Otros parámetros, cuarto modelo experimental.....	180

CXXII.	Coeficientes de correlación lineal entre los parámetros monitoreados y la eficiencia de remoción de DBO <sub>5</sub> de la unidad de tratamiento .....	181
CXXIII.	Datos de partida para el diseño del quinto modelo experimental mediante el método de carga máxima por radiación solar .....	182
CXXIV.	Descarga de agua miel a aplicar al quinto modelo experimental ..	183
CXXV.	Monitoreo del oxígeno disuelto para cálculo de la DBO <sub>5</sub> .....	184
CXXVI.	Variación de la DBO <sub>5</sub> para la muestra del 07-mayo-2012.....	185
CXXVII.	Variación de la DBO <sub>5</sub> para la muestra del 08-mayo-2012.....	186
CXXVIII.	Variación de la DBO <sub>5</sub> para la muestra del 09-mayo-2012.....	187
CXXIX.	Cálculo de la DBO <sub>5</sub> para el período de muestreo.....	188
CXXX.	Eficiencia de remoción de DBO <sub>5</sub> de la unidad de tratamiento.....	189
CXXXI.	Eficiencia del 70% esperada, quinto modelo experimental .....	191
CXXXII.	Otros parámetros, quinto modelo experimental .....	191
CXXXIII.	Coeficientes de correlación lineal entre los parámetros monitoreados y la eficiencia de remoción de DBO <sub>5</sub> de la unidad de tratamiento .....	192
CXXXIV.	Criterios de calidad para abastecimiento industrial y generación de energía .....	195
CXXXV.	Resumen de resultados de los modelos experimentales .....	202



## RESUMEN

El estudio especial “Evaluación de la eficiencia de modelos experimentales de lecho de roca caliza y laguna facultativa, a escala de laboratorio, para el ajuste del potencial de hidrógeno y la remoción de la carga contaminante de las aguas mieles de un beneficio húmedo tecnificado de café” fue estructurado de forma tal que permitiera conocer la caracterización de las aguas estudiadas para determinar los parámetros físicos y químicos más relevantes que describen su naturaleza con la finalidad de evaluar alternativas experimentales de tratamiento primario, a escala de laboratorio, apropiadas mediante la aplicación de tecnologías de bajo costo operativo y minimizando la generación de subproductos contaminantes de origen químico.

Los resultados obtenidos mediante la realización del estudio evidencian el carácter biodegradable de las aguas residuales producto del procesamiento del café y su factibilidad técnica para la implementación de procesos biológicos unitarios, sustentados en el valor de su índice de biodegradabilidad, que es igual a 0,68.

Por otra parte, en base a la determinación de las características físicas y químicas relevantes (para el presente estudio especial) del agua miel generada durante el lavado y despulpado del café se concluye que el agua empleada en este proceso sufre una disminución considerable de su calidad medida en términos de una pérdida promedio de 6 mg/l de oxígeno disuelto; una acidificación severa, medida en términos de una disminución promedio de 2,93 unidades de pH; la adición de un alto contenido de materia de origen orgánico, medido en términos de contenido de sólidos volátiles; y un aumento en su

contenido de nutrientes expresado como un incremento promedio de 125,12% de contenido global de nitrógeno inorgánico y de un 418,17% de contenido global de ortofosfatos.

La evaluación del modelo experimental de lecho de roca caliza, a escala de laboratorio, ensayado a diferentes alturas de medio y cargas hidráulicas permitió determinar la ecuación que describe el comportamiento del potencial de hidrógeno del efluente, obteniéndose un valor promedio de potencial de hidrógeno ajustado instantáneamente igual a 6,14 unidades de pH, a partir de un valor inicial promedio de 5,13 unidades de pH.

La evaluación del modelo experimental de laguna facultativa, a escala de laboratorio, ensayado para diferentes valores de carga máxima  $DBO_5$  para un período de retención hidráulica de seis (6) días permitió determinar que la eficiencia experimental promedio para la remoción de la carga contaminante, en términos de  $DBO_5$  soluble, es igual a 61,60%

Cabe mencionar que, los datos experimentales, procedimientos, metodologías, análisis, conclusiones y recomendaciones enlistados en el presente estudio especial corresponden exclusivamente a las aguas residuales producto del procesamiento del café generadas en el beneficio húmedo tecnificado de la Cooperativa Nuevo Sendero durante la cosecha 2012-2013.

## **ASPECTOS GENERALES**

### **INTRODUCCIÓN**

El presente estudio especial tiene como finalidad evaluar la eficiencia de modelos experimentales de lecho de roca caliza y laguna facultativa, a escala de laboratorio, como alternativas de tratamiento primario para el ajuste instantáneo del potencial de hidrógeno y la remoción de la carga contaminante de las aguas mieles de un beneficio húmedo tecnificado, respectivamente.

Las aguas residuales del proceso de despulpado y lavado del café, comúnmente conocidas como aguas mieles se consideran como una de las mayores contaminaciones orgánicas en el sector cafetalero debido a su alto contenido de materia orgánica y su condición ácida.

Tomando en cuenta que el tratamiento de las aguas mieles ha sido una preocupación constante, tanto del sector cafetalero como de la población en general, en la República de Guatemala, desde hace más de 40 años; se han realizado esfuerzos para minimizar la contaminación generada por el proceso, sin embargo, los resultados de las evaluaciones de los procesos implementados en la actualidad denotan la necesidad de desarrollar líneas de investigación encaminadas a lograr una mayor eficiencia en la gestión de la reducción de los impactos adversos generados por la contaminación de estas aguas y otros subproductos de desecho del procesamiento del café.



Ante tal situación, el simple hecho de no resolver de una forma definitiva ésta problemática, constituye una justificación para promover la investigación a nivel experimental de los procesos unitarios involucrados en la depuración de las aguas residuales producto del procesamiento del café.

## OBJETIVOS

### General

Evaluar la eficiencia de modelos experimentales de lecho de roca caliza y laguna facultativa, a escala de laboratorio, como alternativas de tratamiento primario para el ajuste instantáneo del potencial de hidrógeno y la remoción de la carga contaminante, expresada en términos de la  $DBO_5$  soluble, de las aguas residuales producto del procesamiento del café en un beneficio húmedo tecnificado, respectivamente.

### Específicos

1. Determinar las características físicas, químicas y bacteriológicas del agua empleada para el lavado y despulpado del café y su relevancia para el procesamiento del fruto del café.
2. Determinar las características físicas y químicas relevantes (para el presente estudio especial) del agua residual producto del procesamiento del café.
3. Determinar el índice de biodegradabilidad ( $DBO_5 / DQO$ ) característico del agua residual producto del procesamiento del café.
4. Evaluar el sistema de tratamiento actual en términos de la eficiencia de remoción de carga contaminante,  $DBO_5$ , y el ajuste del potencial de hidrógeno de las aguas residuales producto del procesamiento del café.
5. Determinar el valor promedio del potencial de hidrógeno ajustado de manera instantánea en el efluente del modelo de lecho de roca caliza.

6. Determinar el porcentaje promedio de remoción de la carga contaminante, en términos de  $DBO_5$ , para el modelo de laguna facultativa a escala de laboratorio.

## **HIPÓTESIS**

La evaluación de modelos experimentales de lecho de roca caliza y laguna facultativa, a escala de laboratorio, permite obtener un ajuste instantáneo del potencial de hidrógeno hasta un rango cercano a 7,0, y, una eficiencia de remoción promedio, expresada en términos de la  $DBO_5$  soluble, de hasta un 60% de la carga contaminante de las aguas residuales producto del procesamiento del café en un beneficio húmedo tecnificado, respectivamente.

## ANTECEDENTES

El tratamiento de las aguas mieles ha sido una preocupación constante del sector cafetalero en la República de Guatemala desde hace más de 40 años.

En 1960 fue creada la Asociación Nacional del Café, ANACAFÉ, que es el organismo encargado de promover los más altos estándares en cada uno de los aspectos de la producción del café a nivel nacional, tanto para el fortalecimiento local de sus agremiados como para la exportación de sus cultivos.

Desde entonces, ANACAFÉ ha venido realizando esfuerzos para la implementación de buenas prácticas en los procesos productivos de los beneficios de café de sus agremiados con la finalidad de minimizar tanto el volumen de agua miel generado como el impacto ambiental que se produce por la descarga de estos efluentes a los cuerpos receptores.

Entre los documentos que ANACAFÉ ha generado se encuentran los siguientes:

- “Los desechos del beneficiado y la contaminación de las fuentes de agua” publicado en julio de 1988 por Cesar A. Rodas.
- “Avances en el tratamiento físico-químico de aguas residuales del beneficiado húmedo del café por medio de plantas depuradoras en Guatemala” publicado en 2004 por el Departamento de desarrollo y medio ambiente de ANACAFÉ.

Adicionalmente se han realizado esfuerzos organizados en conjunto con otras organizaciones, como la Agencia Internacional para Desarrollo del gobierno de los Estados Unidos (USAID), para minimizar la contaminación generada por el proceso obteniéndose resultados como: la disminución del 90 % en el consumo de agua de un beneficio húmedo tecnificado y el aprovechamiento de los subproductos del café.

La Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS), la Universidad de San Carlos de Guatemala, a través de la Escuela de Ingeniería Química, así como la Universidad Rafael Landívar, a través de la Facultad de Ciencias Ambientales y Agrícolas, han fomentado la investigación de la problemática del tratamiento de las aguas mieles, a partir de la cual se han generado las siguientes investigaciones:

- Consideraciones sobre las aguas mieles y su tratamiento. Ing. Rafael A. Villalta Fernández, noviembre de 1975.
- Efecto del tratamiento químico y biológico en la remoción de carga contaminante de las aguas residuales generadas en los beneficios húmedos de café. Ing. Luis Roberto Soto Fuentes, abril de 2007.
- Neutralización del potencial de hidrógeno del agua miel de un beneficio húmedo tecnificado de café. Ing. Claudia Cerrato Espinal, junio de 2013.

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

El beneficio húmedo tecnificado de la cooperativa Nuevo Sendero, ubicado en el municipio nueva Santa Rosa del departamento de Santa Rosa, cuenta con un sistema de tratamiento para la depuración parcial de las aguas residuales generadas durante el procesamiento del fruto del café, comúnmente denominadas “aguas mieles”.

El sistema de tratamiento actual consiste en un tratamiento físico-químico que consta de un tanque de homogenización, un canal de rejillas, un dispositivo de mezcla rápida que simula las condiciones de un flujo helicoidal, cuatro tanques rectangulares de sedimentación que operan en paralelo y una laguna para el almacenamiento de las aguas residuales tratadas.

De acuerdo a registros históricos de análisis de laboratorio realizados a los efluentes de cosechas pasadas, se ha establecido que la depuración parcial de las aguas mieles a través del tratamiento físico-químico implementado actualmente permite obtener porcentajes de remoción de hasta un 60 % en los valores de  $DBO_5$  y DQO, como referentes; sin embargo, tanto la carga contaminante como el potencial de hidrógeno característicos de las aguas mieles, entre otros, presentan valores que no cumplen con los parámetros establecidos por el reglamento 236-2006 para la descarga de aguas residuales a un cuerpo receptor sin ninguna restricción adicional.

Considerando el impacto ambiental adverso generado por la descarga de las aguas residuales tratadas y no tratadas a los cuerpos receptores, aunado a la constante preocupación del sector agro-industrial cafetalero por este hecho,

se plantea la necesidad de evaluar alternativas experimentales de tratamiento primario, a escala de laboratorio, para el ajuste del potencial de hidrógeno y la remoción de la carga contaminante de las aguas mieles de un beneficio húmedo tecnificado.

Ante esto, se caracterizaron las aguas mieles producto de la cosecha 2012-2013 para determinar si son adecuadas para la implementación de las alternativas experimentales de tratamiento primario descritas que permitan el aprovechamiento del sustrato orgánico disponible en las mismas.

¿Será que las alternativas experimentales de tratamiento primario consideradas logran una eficiencia en los porcentajes de remoción de la carga contaminante,  $DBO_5$ , equivalente o superior a la eficiencia del tratamiento físico-químico implementado actualmente?

## JUSTIFICACIÓN

Las aguas residuales del proceso de despulpado y lavado del café, comúnmente conocidas como aguas mieles se consideran como una de las mayores contaminaciones orgánicas en el sector cafetalero debido a su alto contenido de materia orgánica y su condición ácida.

La naturaleza química del agua miel está directamente relacionada con la composición físico química de la pulpa y el mucílago del grano de café, que son los elementos que determinan la capacidad contaminante de la misma mediante la adición de materia orgánica, fósforo, nitrógeno, carbohidratos no fermentados, alcoholes, ácidos orgánicos, taninos, cafeína, ácido cafeíco y ácido clorogénico, entre otros; durante su contacto turbulento e intenso con el agua empleada en el proceso.

La necesidad de implementar un tratamiento apropiado de depuración para las aguas mieles obedece a la urgencia de mitigar el impacto ambiental adverso generado por la descarga de las mismas a los cuerpos receptores.

La contaminación ambiental que generan las aguas mieles en los cuerpos receptores es consecuencia de la oxidación de la materia orgánica contenida en las mismas, que es realizada por la microflora bacteria que consume todo el oxígeno disuelto en el agua creando así una situación de ausencia de oxígeno que perjudica la restante flora y fauna acuática; adicionalmente, cuando la demanda de oxígeno por parte de las bacterias supera la cantidad de oxígeno disuelto naturalmente en el agua los microorganismos utilizan el oxígeno



contenido en los nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) y en los sulfatos ( $\text{SO}_4^-$ ) originando moléculas de bisulfuros ( $\text{SH}_2$ ) responsables de olores desagradables.

Debido a esto, se propone iniciar una línea de investigación orientada al estudio de las aguas residuales producto del procesamiento del café que comprenda la caracterización de las aguas estudiadas para determinar los parámetros físicos y químicos más relevantes que describen su naturaleza con la finalidad de evaluar alternativas experimentales de tratamiento primario, a escala de laboratorio, apropiadas mediante la aplicación de tecnologías de bajo costo operativo y minimizando la generación de subproductos contaminantes de origen químico.

## **ALCANCE**

El alcance del presente estudio especial comprende la caracterización de las aguas mieles generadas en el beneficio húmedo tecnificado de la cooperativa nuevo sendero con la finalidad de evaluar alternativas experimentales de tratamiento primario, a escala de laboratorio, apropiadas mediante la aplicación de tecnologías de bajo costo operativo y minimizando la generación de subproductos contaminantes de origen químico.

## **LIMITACIONES**

- No existen antecedentes de investigación, en la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria, relacionados con la determinación de los parámetros físicos y químicos más relevantes que describan la naturaleza de las aguas mieles, generadas en un beneficio húmedo tecnificado, en función de su importancia en la conceptualización de las unidades de tratamiento.
- El trabajo de investigación correspondiente al presente estudio especial se realizó en el período comprendido entre el mes de octubre de 2012 y el mes de mayo de 2013, por lo que el período de desarrollo de la investigación resultó ser muy corto para el análisis exhaustivo de los parámetros de control previamente establecidos en la evaluación de los modelos experimentales.
- La disponibilidad de aguas mieles es limitada y únicamente comprende los meses de recolección de las cosechas, los cuales, para el caso

particular de la cosecha 2012-2013 del beneficio nuevo sendero, estuvieron comprendidos entre la última semana del mes de octubre de 2012 y la última semana del mes de marzo de 2013; por lo que fue necesario el almacenamiento refrigerado de las muestras recolectadas para su posterior uso en el laboratorio.

- El presupuesto disponible para la realización del presente estudio especial impidió la construcción y montaje de más de un modelo experimental operado de forma simultánea; además de que no permitió realizar la operación de los modelos experimentales bajo condiciones de laboratorio totalmente controladas.

# **1. MARCO TEÓRICO**

## **1.1. Las aguas residuales**

El término “agua residual” define el conjunto de aguas que han entrado en contacto con elementos contaminantes debido al uso al que han estado sometidas y que han sufrido una alteración perjudicial de su calidad en sus características físicas, químicas y/o bacteriológicas producto de dicho contacto.

El conocimiento de la naturaleza de las aguas residuales es fundamental para la determinación del proceso de tratamiento apropiado para que la descarga de los efluentes obtenidos y su reutilización no representen una fuente de contaminación al medioambiente.

### **1.1.1. Características y caracterización de las aguas residuales**

Las aguas residuales se caracterizan por su composición física, química y biológica (Metcalf & Eddy, Inc., 1996). Para la caracterización del agua residual se emplean tanto métodos de análisis cuantitativos, para la determinación de su composición química, como métodos de análisis cualitativos para la determinación de sus características físicas y biológicas.

Las características físicas más importantes del agua residual son el contenido total de sólidos, la temperatura, el color, el olor y la turbiedad.

Las características químicas más importantes del agua residual son el contenido de materia orgánica, el potencial de hidrógeno, la alcalinidad, la acidez y el contenido de nutrientes como ser nitrógeno y fósforo.

### **1.1.2. Clasificación de las aguas residuales**

Las aguas residuales urbanas, según la Comunidad Económica Europea (CEE), se clasifican de acuerdo a su origen y composición según el siguiente detalle:

- Aguas residuales urbanas (municipales): son las aguas residuales domésticas, o la mezcla de éstas con aguas residuales industriales o con aguas de escorrentía pluvial.
- Aguas residuales domésticas: son las aguas residuales procedentes de zonas de vivienda y de servicios, generadas principalmente por el metabolismo humano y las actividades domésticas.
- Aguas residuales industriales: son todas las aguas residuales vertidas desde locales utilizados para cualquier actividad comercial o industrial, que no sean aguas residuales domésticas ni aguas de escorrentía pluvial.

### **1.2. Las aguas mieles**

Las aguas mieles son las aguas residuales generadas durante el procesamiento del café que se caracterizan por presentar un alto contenido de materia orgánica, incluidos los ácidos grasos volátiles (AGV), las sustancias pécticas y otros contaminantes.

### **1.2.1. El procesamiento del café en un beneficio húmedo tecnificado**

El procesamiento del café en un beneficio húmedo tecnificado consta de las siguientes operaciones principales:

- Recibimiento y clasificación del fruto
- Remoción de la pulpa del fruto maduro
- Eliminación de la miel o mucílago
- Lavado del grano para desprender los residuos y obtener el café recién lavado con el 54 % de humedad
- Secado del café lavado hasta obtener el llamado café pergamino seco, el cual posee entre el 10 y el 12 % de humedad.

#### **1.2.1.1. Recibimiento y clasificación del fruto**

El recibimiento del café se realiza a medida que se genera el corte del fruto en función de su maduración.

Este proceso se efectúa en un tanque recibidor que es un dispositivo que tiene por objeto almacenar el café que se cosechó en el día para su posterior despulpado.

A continuación se realiza la clasificación del café maduro, en el mismo dispositivo, por medio del principio de flotación o densidad, el cual permite separar los granos de café que sean defectuosos.

### **1.2.1.2. Remoción de la pulpa del fruto maduro**

La remoción de la pulpa consiste en la eliminación de la cáscara o pulpa del grano del café por medio del uso de dispositivos mecánicos conocidos con el nombre de despulpadores.

La pulpa representa aproximadamente el 40 % en peso del fruto fresco, y es, por lo tanto, el residuo más voluminoso que se produce en los beneficios húmedos tecnificados.

### **1.2.1.3. Eliminación de la miel o mucílago**

La eliminación de la miel o mucílago se realiza mediante un proceso de fermentación natural o tradicional, en tanques rectangulares, que tienen un período de retención que depende de factores ambientales tales como temperatura y altitud.

El proceso de fermentación natural permite la degradación del mucílago a una sustancia soluble que facilite su remoción mediante el lavado de los granos fermentados.

El mucílago representa aproximadamente el 20 % en peso del fruto maduro y está formado principalmente por pectinas y azúcares que deben eliminarse.

#### 1.2.1.4. Lavado del grano de café

El lavado del grano de café consiste en la remoción de los restos de mucílago, las sustancias solubles y los materiales desprendidos durante la fermentación con el objeto de obtener un pergamino limpio sin restos de miel adheridos que puedan provocar problemas durante el secado de los granos.

#### 1.2.1.5. Secado del café lavado

El proceso de secado consiste en la eliminación parcial de la humedad remanente en el grano de café posteriormente a su lavado y escurrido, generalmente en patios de secado, hasta obtener un contenido de humedad comprendido entre el 10 % y el 12 %.

Figura 1. El procesamiento del fruto del café



Fuente: elaboración propia.



### **1.2.2. Breve descripción de la proceso de generación de las aguas mieles en el beneficio húmedo tecnificado Nuevo sendero**

El beneficio Nuevo sendero es una beneficio húmedo tecnificado en el cual se recircula el agua empleada durante el proceso con el objetivo de minimizar el volumen de agua requerido por quintal de fruto de café procesado; sin embargo, esta disposición genera la problemática de que se obtiene un agua residual con una alta carga contaminante como principal subproducto de desecho.

El proceso de beneficiado húmedo consiste en la transformación del café maduro en café pergamino seco, mediante el uso de agua en diferentes etapas del proceso. Esta actividad requiere un alto volumen de agua, como mecanismo de transporte y medio para la clasificación del grano.

Según datos proporcionados por ANACAFÉ, se estima que, en este tipo de beneficio, se emplea un promedio de 200 litros de agua para procesar un quintal de café pergamino seco, y, de manera equivalente, se emplea este volumen de agua para procesar 4,75 quintales de café en fruto.

La recirculación del agua consiste en reutilizar el agua del proceso de lavado del grano del café, mediante el uso de una bomba centrífuga y un tanque de concreto, que debe construirse en la parte más baja del beneficio, conocido como "tanque recolector decantador", al cual debe llegar por gravedad toda el agua de lavado.

Esta agua de lavado se almacena para ser empleada posteriormente en el proceso de despulpado de los granos de café, por lo que, el agua residual

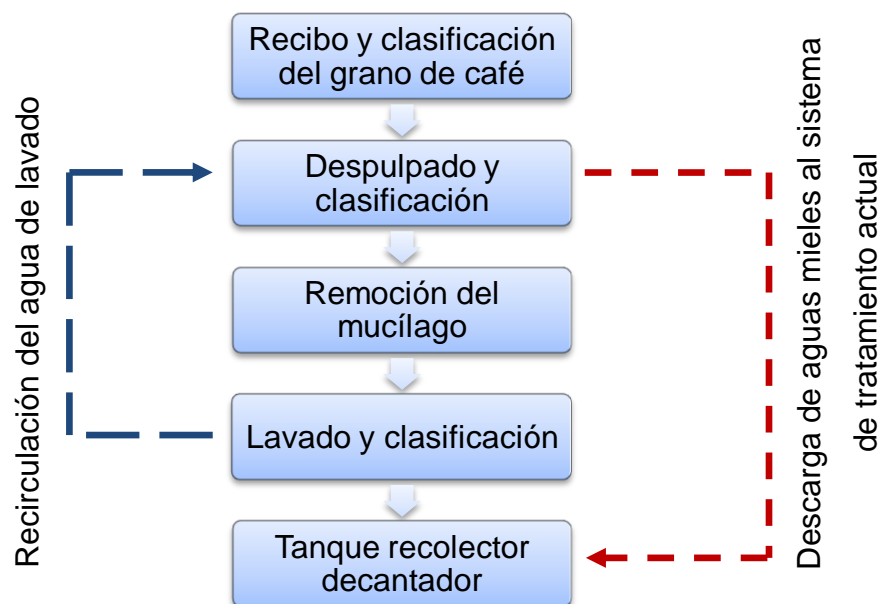
generada, tiene dos (2) usos que son: el lavado y el despulpado de los granos de café.

Las principales ventajas de la recirculación del agua son:

- Reduce la cantidad de agua empleada en el proceso de lavado y despulpado del café debido a los dos usos que se le da al mismo volumen de agua
- Acelera el proceso de despulpado debido al alto contenido de materia orgánica presente en el agua empleada durante esta etapa.

Posteriormente, el agua residual generada es descargada al sistema de tratamiento actual para su manejo y disposición final.

Figura 2. **Usos del agua durante el procesamiento del fruto del café**



Fuente: elaboración propia.

Figura 3. **Proceso del beneficiado húmedo del café**



Fuente: Anacafé.

### 1.2.3. Manejo actual de las aguas mieles en el beneficio húmedo tecnificado Nuevo sendero

El manejo actual de las aguas mieles en el beneficio húmedo tecnificado "Nuevo sendero" consiste en un tratamiento primario físico químico para la disposición final de las aguas residuales.

El tren de tratamiento comprende las siguientes etapas:

- Remoción de sólidos de gran tamaño mediante el empleo de un canal de rejas al ingreso del sistema de tratamiento.

- Ajuste del potencial de hidrógeno mediante la adición de una solución de hidróxido de calcio, en una unidad de mezcla artesanal que simula las condiciones de flujo en un mezclador de tipo helicoidal.
- Decantación de los sólidos sedimentables en diversos tanques de sedimentación rectangulares que tienen un período de retención que oscila entre 24 y 120 horas, en función del aumento en el volumen de procesamiento requerido.
- Disposición final de las aguas decantadas y los lodos producidos en respectivas lagunas de almacenamiento.

### **1.3. Ajuste del potencial de hidrógeno mediante lechos de contacto de roca caliza**

La neutralización, o ajuste de pH, generalmente adición de un álcali o de un ácido a un residuo, para obtener un rango de pH cercano a 7, se usa para proteger fuentes receptoras de descargas alcalinas o ácidas fuertes, o para permitir el tratamiento posterior de dichos residuos.

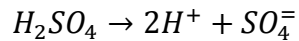
Considerando que las normas de vertimiento establecen un pH entre 5 y 9, la neutralización constituye un proceso químico de pretratamiento en muchos residuos industriales. El proceso, sin embargo, requiere valorar con cuidado el efecto de cualquier reacción perjudicial al sistema de recolección o de tratamiento posterior que pueda ocurrir después de la neutralización, por ello, además de la obtención de un pH adecuado, es importante asegurar una capacidad de tampón suficiente para mantener dicho pH.

En toda fuente receptora, el pH es un factor importante para los sistemas de reacciones químicas y biológicas.

### 1.3.1. Fundamentos

La neutralización supone la reacción de soluciones, con iones hidrógeno o hidróxido activos, para formar agua y sales neutras.

Existen ácidos y bases fuertes o débiles. Un ácido fuerte tiene, prácticamente todos sus iones  $H^+$  libres en solución:



Los ácidos débiles no se disocian completamente y, por ello, son débiles. Sin embargo, dos ácidos de concentración normal igual tienen la misma acidez total y requieren la misma cantidad de base para su neutralización, es decir, poseen igual capacidad de neutralizar un álcali. Lo mismo se aplica a las bases.

La adición de un ácido, o de un álcali, a una solución no produce necesariamente un cambio de pH si la solución tiene una capacidad de tampón apropiada, es decir, si tiene una alcalinidad total o una acidez total suficiente para amortiguar la ionización del ácido en iones  $H^+$  o de la base en  $H^-$ .

La neutralización de aguas ácidas se hace comúnmente agregando cal, óxido de cal, óxido o hidróxido de magnesio o hidróxido de sodio. La cal, óxido de cal ( $CaO$ ), o su forma hidratada, hidróxido de calcio ( $Ca(OH)_2$ ), es la más usada por su bajo costo. Sin embargo, la gran cantidad de lodo producido es un problema significativo. Asimismo la solubilidad y el potencial de hidrógeno de diferentes soluciones de cal varían en función de la concentración de cal en la solución y de la temperatura.

El hidróxido de sodio (NaOH), aunque costoso, es una forma química muy conveniente para neutralización de residuos ácidos en plantas pequeñas y cuando se quiere minimizar la cantidad de lodo producido.

Cuando se hace ajuste de pH de un residuo, para tratamiento biológico posterior, hay que tener en cuenta que la actividad biológica puede introducir cambios de pH en el residuo, por mecanismos diferentes.

La oxidación bioquímica de ácidos orgánicos y la destrucción de sales de ácidos orgánicos aumentan el pH en reactores biológicos. Además la adición de cal para neutralización, como pretratamiento, puede incrementar, al combinarse con el CO<sub>2</sub> de la actividad biológica, la dureza en el efluente y la formación de precipitados de CaCO<sub>3</sub> si se combina con aguas alcalinas.

Muchos de los procesos de tratamiento de aguas residuales industriales necesitan ajuste de pH y, por consiguiente, el efluente requiere neutralización.

### **1.3.2. Método de ajuste de potencial de hidrógeno mediante lechos de roca caliza**

La neutralización de residuos ácidos con lechos de roca caliza se hace con flujo ascensional preferiblemente. La concentración de ácido se limita a 0,60 % - H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> para evitar el recubrimiento de la caliza con CaSO<sub>4</sub> y la evolución excesiva de CO<sub>2</sub>. Con lechos de caliza dolomítica se requiere mayor tiempo de contacto. En lechos de flujo ascensional se puede aumentar la carga hidráulica, en comparación con los lechos de flujo en descenso, en los cuales la carga hidráulica se limita a 60 m/día, para asegurar un tiempo de contacto apropiado.

Es importante tener en cuenta la influencia de los siguientes factores:

- Igualar al máximo posible el caudal y el pH del afluente al proceso de neutralización.
- Desarrollar curvas de titulación para el afluente, que permitan hacer un diseño y operación apropiados del proceso de neutralización
- Caracterizar cuantitativa y cualitativamente el lodo o residuo del proceso de neutralización.
- Determinar el efecto del compuesto químico agregado, durante el proceso de neutralización, sobre la calidad del efluente y sobre cualquier método ulterior de tratamiento.
- Desarrollar un sistema efectivo de control del proceso de neutralización.

El éxito o fracaso del proceso de neutralización radica en su control apropiado.

#### **1.4. Tratamiento biológico de las aguas mieles**

En esta sección se describen, de lo general a lo específico, las características y factores asociados a un proceso biológico de tratamiento de aguas residuales. Se entenderá por aguas residuales aquellas a las, que producto de diferentes actividades del ser humano (acciones de tipo doméstico, industrial y/o de servicios generales), le son adicionados constituyentes (elementos tales como sólidos suspendidos o nitrógeno amoniacal) considerados contaminantes y que producto de su interacción con el agua cambian las características físicas, químicas y/o biológicas de ésta, de tal forma que no es posible considerarla como apta para usos posteriores sin poner en riesgo la salud de los seres vivos y el medio donde estos habiten.

### **1.4.1. Procesos biológicos unitarios**

Si se considera un entorno controlado y previamente analizado de un medio biológico, con el objeto de realizar un tratamiento de aguas residuales, es posible efectuar un tratamiento de esta agua por un sistema basado en un proceso biológico unitario.

#### **1.4.1.1. Objetivo del tratamiento biológico**

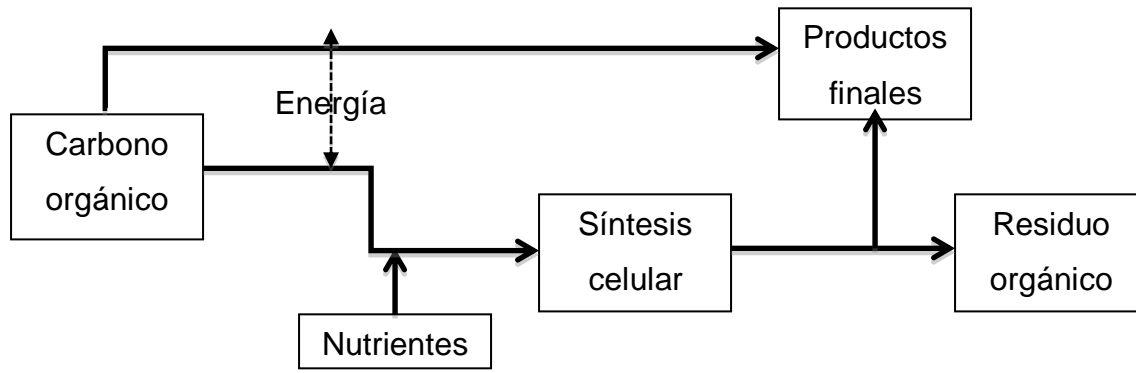
Basados en los procesos naturales y en las características de las aguas residuales biológicamente tratables, el objetivo del tratamiento biológico se define como la reducción de la materia orgánica soluble en el agua, y la eliminación de nutrientes como nitrógeno y fósforo. Especialmente en aguas residuales de origen industrial, el objetivo de este tratamiento es la reducción de materia orgánica e inorgánica.

### **1.4.2. Relación nutrición bacteriana y los procesos biológicos de tratamiento**

La base de un tratamiento biológico exitoso es la determinación de las características del agua residual que se desea tratar, de tal forma que se identifiquen si la misma posee los elementos requeridos para iniciar y sostener un proceso biológico de reducción del contenido de materia orgánica en forma de DBO carbonosa disuelta en el agua residual, considerando que este es el principal objetivo de un proceso de este tipo. Para tal efecto son de gran importancia los organismos quimioheterótrofos, pues requieren energía, carbono y compuestos orgánicos.



Figura 4. **Esquema del metabolismo bacteriano quimioheterótrofo**



Fuente: Metcalf & Eddy, 1996.

Las aguas residuales de cualquier origen (municipales o industriales) que posean materia orgánica y que se quieran tratar por medio de un proceso biológico, deben también poseer los nutrientes en cantidad suficiente, caso contrario se deberá añadir los mismos y de esta forma obtener el adecuado crecimiento bacteriano que propicie la degradación esperada de la materia orgánica.

### **1.4.3. Procesos biológicos para el tratamiento de aguas residuales**

Los procesos biológicos utilizados en el tratamiento de aguas residuales se concentran en 5 grupos principales:

- A. Procesos aerobios
- B. Procesos anaerobios
- C. Procesos anóxicos
- D. Procesos aerobios, anaerobios y anóxicos combinados

## E. Procesos de lagunas

Todos los procesos biológicos tienen su origen en fenómenos de la naturaleza. El proceso de tratamiento biológico se resume en el control del medio de los microorganismos, con el objeto de conseguir replicar las condiciones de crecimiento óptimo.

Las principales aplicaciones del proceso biológico son:

- A. Eliminación de la materia orgánica carbonosa del agua residual, en términos de DBO, carbono orgánico total (COT) o demanda química de oxígeno (DQO).
- B. Nitrificación
- C. Desnitrificación
- D. Eliminación de fósforo
- E. Estabilización de lodos

### **1.4.4. Lagunas de estabilización como sistemas de tratamiento de aguas residuales**

Las lagunas de estabilización son excavaciones realizadas en un terreno para el tratamiento de aguas residuales. Las lagunas poseen profundidades variables. Las lagunas de estabilización se pueden clasificar en función de la concentración de oxígeno disuelto y la fuente que suministra el oxígeno necesario para la asimilación bacteriana de los compuestos orgánicos presentes en el agua. A continuación se presenta la clasificación de las lagunas:

Tabla I. **Clasificación de las lagunas con base en la presencia y fuentes de oxígeno**

<b>Clase de laguna</b>	<b>Presencia de oxígeno</b>
Aerobia	La fotosíntesis suministra el oxígeno necesario para mantener condiciones aerobias en modo de columna de agua.
Facultativa	La zona superficial es aerobia.
Aireada con mezcla parcial	La aireación superficial produce una zona aerobia que puede alcanzar la totalidad de la profundidad.
Anaerobia	La totalidad de la profundidad es anaerobia.

Fuente: Crites & Tchobanoglous, 2000.

#### **1.4.4.1. Sobre los criterios de dimensionamiento de lagunas de estabilización**

Si bien es verdad que existen muchos estudios basados en experiencias con lagunas de estabilización, los modelos matemáticos desarrollados son pocos. La respuesta de este hecho es que las lagunas están sujetas a una variedad de procesos físicos y biológicos y la mayoría de modelos carecen de suficientes detalles para describirlos. Existen tres enfoques de modelos cinéticos para el dimensionamiento que incluyen modelos cinéticos y muchos basados en correlaciones empíricas desarrolladas a través de experiencias de campo.

Sin importar el éxito experimental de dichos modelos, es importante reconocer que la aplicación de estos modelos es únicamente válida dentro de las condiciones en las cuales fueron desarrolladas.

#### **1.4.4.2. Modelos para lagunas facultativas a escala de laboratorio**

A efecto de realizar análisis del comportamiento de la asimilación de la materia orgánica en las lagunas de estabilización, se propone el uso de un modelo físico a escala reducida de laboratorio. Algunas ventajas de realizar evaluaciones de la cinética de las lagunas bajo este concepto son:

- Es posible realizar el control de elementos tales como el caudal, uniformidad de desecho, iluminación y temperatura.
- Reducción de trabajo experimental de mediciones; registros de caudal y muestreos.
- Posibilidad de conducir pruebas replicadas, lo que proporciona mayor seguridad en los resultados.

Los experimentos con este tipo de modelos se realizan en instalaciones de carácter no permanente. Las instalaciones de laboratorio suelen consistir en tanques de tamaño reducido con luz artificial o simples pruebas batch en botellas.

Se ha documentado al menos dos tipos de pruebas de mucha utilidad a escala de laboratorio. La primera es una simulación de la degradación anaeróbica en reactores pequeños. Se han utilizado botellas de 10 y 15 litros, con lo que se ha estudiado la tratabilidad de desechos de la industria de la carne. Existen experiencias documentadas en la India donde se han usado

botellas de cinco litros para estudiar la tratabilidad de desechos de la industria del procesamiento de leche.

Para la determinación de las constantes de degradación de la materia orgánica con muestras de laguna a escala piloto o a escala completa se puede utilizar la prueba de consumo de oxígeno por diferencia diaria.

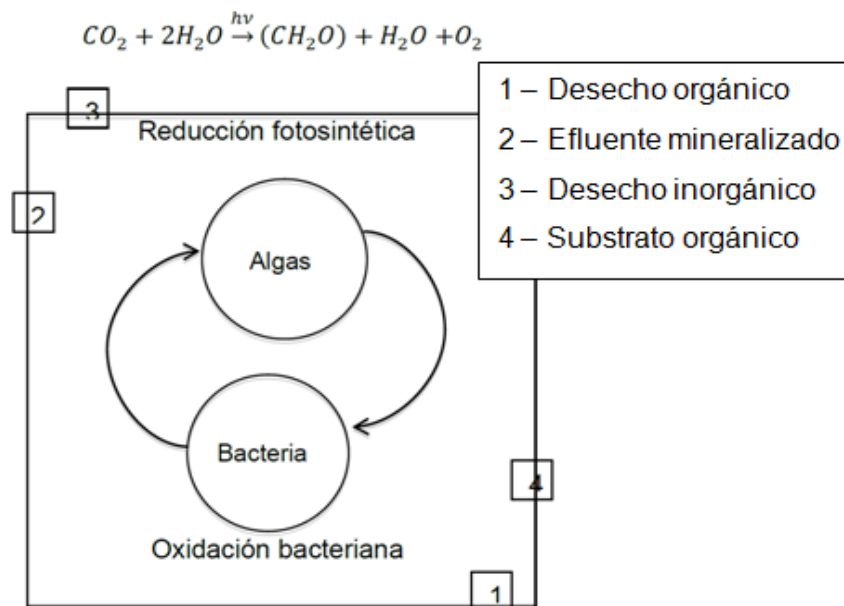
Se destaca que las constantes de degradación obtenidas por este método corresponden a biodegradación filtrada de muestras. La utilidad de esos valores es en la interpretación de mecanismos de degradación en una laguna, efecto del período de tratamiento e influencia del lodo de fondo. Considerando que las constantes de biodegradación o reacción varían con la profundidad según el tipo de laguna, estos valores no pueden adoptarse como constantes de reacción para propósitos de diseño de lagunas, a menos que sean representativos de todo el contenido de la laguna y se introduzcan correcciones que tomen en cuenta el submodelo hidráulico de la laguna. Es así que la conducción de pruebas batch de campo a escala reducida ofrece la ventaja de proporcionar condiciones más controladas en el proceso experimental.

En relación al tratamiento de aguas residuales industriales en lagunas, se han realizado muchos experimentos para estudiar la tratabilidad de desechos de la industria de procesamiento de carne, desechos de la industria del azúcar, de la industria del procesamiento de la leche, residuos de la industria de la fermentación y destilería, desechos de procesamiento de comida y desechos con metales pesados.

En relación a modelos de lagunas a escala de laboratorio se han utilizado tanques tipo pecera, generalmente de un volumen de 15 a 45 litros y con luz artificial con el propósito de determinar criterios de diseño, en especial para el estudio de la tratabilidad de los desechos de industrias como la de la carne.

El modelo a escala de laboratorio propuesto se basa en el mecanismos de degradación de la DBO promovida por la simbiosis entre las algas y las bacterias en un medio que supla las necesidades de nutrientes y condiciones adecuadas para su crecimiento. La radiación solar favorece el crecimiento de algas, las que por su actividad favorecen el aumento del pH, elemento este muy importante para la sobrevivencia de la vida microbiana requerida para la transformación de la materia orgánica soluble.

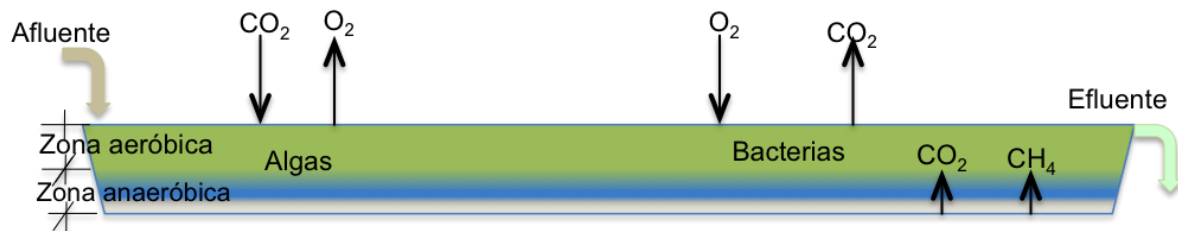
Figura 5. **Diagrama simplificado de comensalismo de algas y bacterias en el ciclo del carbono**



Fuente: YAÑEZ COSSÍO, 1993.

En la zona aeróbica las algas consumen CO<sub>2</sub> y producen O<sub>2</sub> al mismo tiempo, las bacterias consumen O<sub>2</sub> y producen CO<sub>2</sub>. En la zona anaeróbica, donde los lodos se acumulan y digieren, se producen los gases CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>.

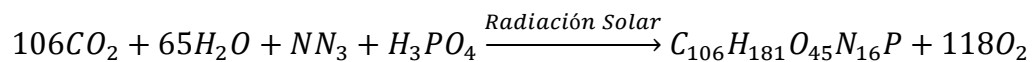
Figura 6. **Esquema de una laguna facultativa**



Fuente: elaboración propia.

#### 1.4.4.3. **Método de radiación solar, para la determinación de la carga orgánica superficial**

Para el diseño de lagunas facultativas se puede utilizar el método de la carga orgánica superficial, que depende de la cantidad de oxígeno producido por las algas en la laguna. La ecuación balanceada que representa la cinética del proceso de asimilación de la materia orgánica y la producción de celdas de algas más oxígeno es la siguiente:



De la ecuación anterior se deduce que de cada 1 kilogramo de celdas se produce 1,55 kilogramos de oxígeno.

La energía solar requerida para producir un kilogramo de celdas de algas es de 24 000 KJoules. De la energía solar que radia la superficie de una laguna facultativa, solamente un porcentaje es utilizado por las algas como resultado de su eficiencia de conversión. La eficiencia de conversión varía entre 2 % y 7 %.

Al integrar la ecuación de fotosíntesis con la conversión de energía a celdas de algas y la eficiencia de conversión de energía solar por las algas, se deduce la siguiente ecuación:

$$CS_m = \frac{(\text{Radiación solar, KJ/ha}) \times (\text{Eficiencia de conversión}) \times (1,55\text{KgO}_2/\text{Kg algas})}{24\ 000\ \text{KJ/Kg algas producidas}}$$

#### 1.4.4.4. Dimensionamiento de una laguna facultativa

Se parte del área requerida relacionando la concentración promedio de DBO<sub>5</sub> en el afluente, el caudal promedio y la carga superficial máxima, kg DBO<sub>5</sub>/ha-día. La siguiente ecuación integra estos criterios de la siguiente forma:

$$A_{\text{facultativa}} = \frac{10 \times L_{\text{afluente}} \times Q_{\text{med}}}{CS_M}$$

Donde:

$A_{\text{facultativa}}$ : área superficial de la laguna en m<sup>2</sup>.

$L_{\text{afluente}}$ : concentración promedio de DBO<sub>5</sub> en el afluente, mg/l.

$Q_{\text{med}}$ : caudal promedio, m<sup>3</sup>/día.

$CS_M$ : carga superficial máxima, kg DBO<sub>5</sub>/ha-día.



El tiempo de retención hidráulica nominal está dado por la ecuación siguiente:

$$T_{RH} = \frac{V_f}{Q_{med}}$$

Donde:

$T_{RH}$ : tiempo de retención hidráulica nominal de la laguna facultativa, días.

$V_f$ : volumen de la laguna facultativa.

La literatura especializada recomienda considerar un rango de profundidades de entre 1,8 metros a 2,0 metros con el objeto de garantizar condiciones aerobias en el primer metro de profundidad y poseer un espacio para la acumulación de lodos.

La relación largo a ancho en las lagunas facultativas debe ser de 2 a 1 o preferiblemente 3 a 1, para garantizar un flujo tipo pistón.

El cálculo del volumen de la laguna debe considerar las pendientes de los taludes, por lo que se puede utilizar la siguiente ecuación:

$$V_{\text{facultativa}} = \frac{P}{6} [(l \times a) + (l - 2 \times i \times p)(a - 2 \times i \times p) + 4(l - i \times p)(a - ip)]$$

Donde:

$V_{\text{facultativa}}$ : volumen de la laguna facultativa, m<sup>3</sup>.

P: profundidad de la laguna, m.

l: largo de la laguna, m.

A: ancho de la laguna, m.

i: pendiente del talud interior, se adopta normalmente la relación 3:1.

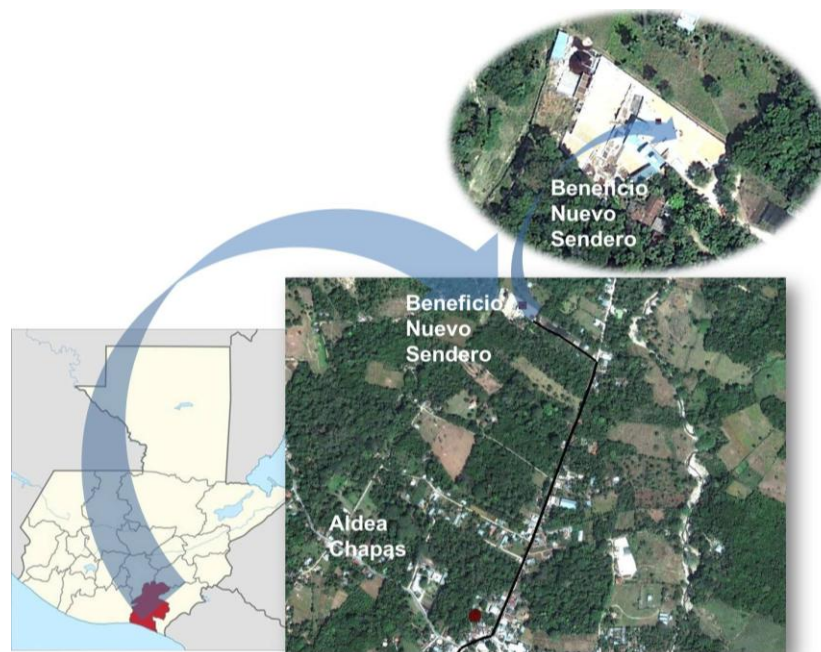
## 2. METODOLOGÍA

La metodología seguida para el desarrollo de la investigación objeto del presente estudio especial se detalla a continuación:

### 2.1. Delimitación del campo de estudio

El campo de estudio de la presente investigación comprende el análisis de las aguas residuales generadas en el beneficio húmedo tecnificado de la cooperativa Nuevo Sendero ubicada en el Departamento de Santa Rosa.

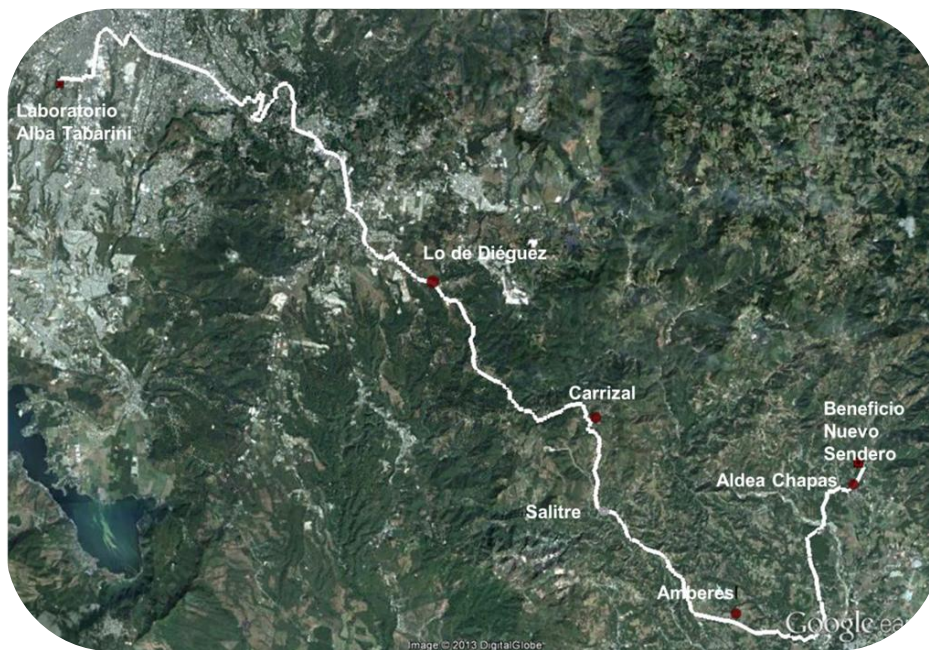
Figura 7. **Ubicación del beneficio de la cooperativa Nuevo Sendero**



Fuente: elaboración propia.

La cooperativa Nuevo Sendero, R.L. está ubicada al oriente del país, en la aldea Chapas del municipio Nueva Santa Rosa del departamento de Santa Rosa, a una altura comprendida entre 1 025 m.s.n.m. y 2 025 m.s.n.m., tiene un área cultivada total de 700 manzanas, en las cuales se producen las siguientes variedades de café: Catuaí, Caturra, Pache Común y Bourbon.

**Figura 8. Trayecto desde el beneficio Nuevo Sendero hasta el laboratorio de química y microbiología sanitaria Alba Tabarini Molina**



Fuente: elaboración propia.

## **2.2. Métodos analíticos**

Los parámetros correspondientes a la caracterización de las aguas utilizadas en el procesamiento del café se determinaron en dos etapas: una de ellas fue realizada en campo, durante la recolección de las muestras; mientras

la otra fue llevada a cabo en el laboratorio de Química y Microbiología Sanitaria “Dra. Alba Tabarini de Molina” de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Las características de las aguas analizadas que fueron determinadas en campo, mediante el uso de equipo de laboratorio portátil, son las siguientes:

- A. Oxígeno disuelto (OD): es el factor que determina la existencia de condiciones aeróbicas o anaeróbicas en un medio particular.

La determinación de este parámetro se realizó mediante el uso de un potenciómetro marca HACH, propiedad de ANACAFE, con electrodo para medición de oxígeno disuelto (OD), el cual se introduce en el recipiente que contiene la muestra a analizar.

- B. Potencial de hidrógeno (pH): forma de expresar la concentración del ion hidrógeno o, más exactamente, la actividad del ion hidrógeno.

En general se usa para expresar la intensidad de la condición ácida o alcalina de una solución, sin que esto quiera decir que mida la acidez total o la alcalinidad total.

La determinación de éste parámetro se realizó mediante el uso de un potenciómetro marca HACH, propiedad de ANACAFE, con electrodo para medición de potencial de hidrógeno (pH), el cual se introduce en el recipiente que contiene la muestra a analizar.

Los parámetros analizados en el laboratorio, fueron determinados siguiendo los procedimientos experimentales detallados en los manuales de laboratorio de las asignaturas de Química y Microbiología del Agua y de

Química y Microbiología Sanitaria de la maestría de Ingeniería Sanitaria de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS).

Los análisis de laboratorio se dividieron en dos categorías:

- A. Parámetros físicos: el procedimiento analítico correspondiente a la determinación de estos parámetros fue realizado a partir de las muestras de agua analizada debidamente homogenizadas.

Los parámetros físicos determinados son los siguientes:

- a. Sólidos sedimentables: sólidos en suspensión que se sedimentarán, en condiciones tranquilas, por acción de la gravedad (Rojas, 2009).

El procedimiento empleado para la determinación de este parámetro consistió en el vertido de una cantidad de 1 000 mililitros de agua residual en un Cono Imhoff para su sedimentación en condiciones de quietud. Cuando habían transcurrido 45 minutos desde el vertido del agua residual, se procedió a raspar las paredes del Cono Imhoff con un agitador de vidrio, y, finalmente, se tomó la lectura de los  $\text{cm}^3$  de sólidos sedimentables observados después de que transcurrió el tiempo total de sedimentación de una (1) hora.

- b. Sólidos suspendidos: La determinación de sólidos suspendidos es de gran valor en el análisis de aguas contaminadas; es uno de los principales parámetros para evaluar la concentración de las aguas

residuales y para determinar la eficiencia de las unidades de tratamiento (Rojas, 2009).

El procedimiento empleado para la determinación de este parámetro consistió en el filtrado de un volumen conocido de la muestra de agua residual analizada a través de una membrana de filtración aplicando succión.

- c. Sólidos totales, volátiles y fijos: los sólidos totales (ST) son el residuo remanente después de que la muestra ha sido evaporada y secada a una temperatura específica de 103 °C a 105 °C (Crites, et al., 2000).

Los sólidos volátiles totales (STV) son los sólidos que pueden ser incinerados cuando los sólidos totales son calcinados a una temperatura de 500 °C  $\pm$  50 °C (Crites, et al., 2000).

Los sólidos fijos totales (SFT) son el residuo que permanece después de incinerar los sólidos totales (Crites, et al., 2000).

El procedimiento empleado para la determinación del contenido de sólidos totales consistió en la evaporación de un volumen de 100 ml de la muestra de agua residual analizada en una cápsula tarada, colocada sobre un baño maría.

Después de la evaporación del agua residual, se procedió a secar la muestra hasta peso constante en una estufa mantenida a una temperatura de 105 °C; para posteriormente completar su enfriamiento en la atmósfera seca del interior de un desecador

durante 15 minutos y, finalmente pesar la cápsula nuevamente para determinar el aumento de peso sobre la cápsula vacía.

El procedimiento empleado para la determinación del contenido de sólidos fijos totales consistió en la calcinación de la cápsula conteniendo los sólidos totales en una mufla, a una temperatura de 600 °C, durante una hora; para posteriormente completar su enfriamiento en la atmósfera seca del interior de un desecador durante 15 minutos y, finalmente pesar la cápsula para determinar la disminución en peso sobre la cápsula conteniendo los sólidos totales.

El contenido de sólidos volátiles totales corresponde a la diferencia, en peso, entre la concentración de los sólidos totales y la concentración de los sólidos fijos totales.

- B. Parámetros químicos: el procedimiento analítico correspondiente a la determinación de estos parámetros fue realizado a partir de las muestras de agua residual diluidas con agua desmineralizada en proporciones volumétricas comprendidas entre 1:5 y 1:6 para obtener un volumen de agua diluida de 250 ml y 300 ml respectivamente.

Los parámetros químicos determinados son los siguientes:

- a. Demanda química de oxígeno (DQO): la determinación de la DQO es una medida de la cantidad de oxígeno consumido por la porción de materia orgánica existente en la muestra y oxidable por un agente químico oxidante fuerte (Rojas, 2009).

El procedimiento empleado para la determinación de este parámetro consistió en la oxidación química, mediante el uso de dicromato de potasio, en un reactor para DQO, de un volumen de 0,20 ml (para un rango de 0 a 15 000 mg/l) de la muestra de agua residual analizada a una temperatura de 150 °C durante dos (2) horas.

- b. Demanda bioquímica de oxígeno ( $DBO_5$ ): es el método usado con mayor frecuencia en el campo de tratamiento de las aguas residuales (Crites, et al., 2000).

El procedimiento empleado para la determinación de este parámetro se denomina prueba estándar de DBO y consiste en la incubación de una pequeña muestra de agua residual en una botella de volumen conocido (300 ml) durante un período de cinco (5) días a una temperatura de 20 °C. La fracción decimal del volumen de muestra usada se establece en función del valor obtenido para la DQO, y el resto del volumen de la botella es completado con agua saturada con oxígeno y con los nutrientes requeridos para el crecimiento biológico.

- c. Alcalinidad: se define como la capacidad de un agua residual para neutralizar ácidos, como su capacidad para reaccionar con iones hidrógeno, como su capacidad para aceptar protones o como la medida de su contenido total de sustancias alcalinas ( $OH^-$ ) (Rojas, 2009). En aguas residuales, la alcalinidad se debe a la presencia de hidróxidos [ $OH^-$ ], carbonatos [ $CO_3^{2-}$ ] y bicarbonatos [ $HCO_3^-$ ] de elementos de calcio, magnesio, sodio, potasio, o de ión amonio (Crites, et al., 2000).



La alcalinidad se determina por titulación con una solución valorada de un ácido mineral fuerte ( $\text{H}_2\text{SO}_4$  0.02 N) y los indicadores de fenolftaleína y anaranjado de metilo.

- d. Acidez: puede definirse como la capacidad de un agua para neutralizar bases, como la capacidad para reaccionar con iones hidróxidos, como su capacidad para ceder protones o como la medida de su contenido total de sustancias ácidas (Rojas, 2009).

La acidez es causada por ácidos orgánicos débiles tales como el carbónico, el acético o tánico y por ácidos minerales fuertes tales como el sulfúrico o el clorhídrico.

La acidez se determina por titulación mediante la adición de iones  $\text{OH}^-$  provenientes de una solución de NaOH 0,02 N y una solución indicadora de fenolftaleína.

- e. Dureza: es originada, principalmente, por la presencia de calcio y magnesio. La dureza puede ser de dos tipos: dureza carbonácea, que es la dureza total químicamente equivalente a los bicarbonatos presentes en el agua; y, dureza no carbonácea, que es toda la dureza que no está relacionada químicamente con los bicarbonatos.

La dureza se determina por titulación con ácido etileno diaminotetra-acético (EDTA) que forma “iones complejos solubles” con el calcio, el magnesio y otros iones causantes de dureza; asimismo se usa la solución indicadora de ericromo negro T que

sirve para indicar cuando todos los iones calcio y magnesio han formado complejo con EDTA.

- f. Nitrógeno inorgánico (en todas sus formas): su determinación es necesaria para evaluar la tratabilidad del agua residual mediante procesos biológicos (Rojas, 2009).

El contenido de nitrógeno inorgánico, en forma de nitrato, nitrito y amoníaco, se determina por medios colorimétricos empleando un espectrofotómetro, marca HACH y los reactivos necesarios para obtener las coloraciones típicas producto de las reacciones químicas requeridas para cada uno de los parámetros analizados.

- g. Fósforo (ortofosfatos): su determinación es necesaria en estudios de polución de ríos, lagos y embalses, así como en los procesos químicos y biológicos de purificación y tratamiento de aguas residuales (Rojas, 2009).

El contenido de ortofosfatos se determina por medios colorimétricos empleando un espectrofotómetro, marca HACH y los reactivos necesarios para obtener las coloraciones típicas producto de las reacciones químicas requeridas para el parámetro analizado.

### 2.3. Análisis estadístico para determinar el número de muestras

La determinación del número de muestras a recolectar en cada uno de los puntos de muestreo, se realizó según el procedimiento establecido en el Método 1060B del libro Métodos Normalizados para el Análisis de Aguas Potables y Residuales.

Se utilizaron las curvas de niveles de confianza establecidos a partir de la siguiente fórmula:

$$N \geq \left( \frac{ts}{U} \right)^2$$

Donde:

$N$  = número de muestras

$ts$  =  $t$  de Student para un nivel de confianza determinado

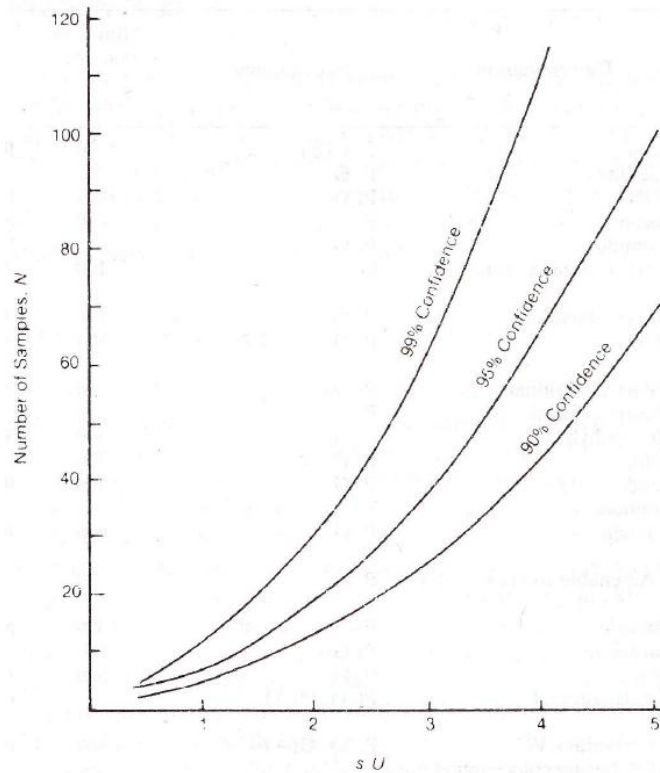
$s$  = desviación estándar global

$U$  = nivel de confianza aceptable

Para una desviación estándar,  $s$ , de 0,020 y un nivel de confianza,  $U$ , de 0,015, se obtiene un valor de 1,33 para la relación  $s/U$ .

A partir de este resultado, se interpola en la Figura 9 para un nivel de confianza del 95 % y se establece que el número de muestras por recolectar debe ser mayor o igual a 10.

Figura 9. **Número aproximado de muestras necesario para calcular una concentración media**



Fuente: Standard methods for the examination of water and wastewater, 1992.

#### 2.4. **Caracterización de las aguas utilizadas en el procesamiento del café**

La caracterización de las aguas utilizadas en el procesamiento del café en el beneficio húmedo tecnificado de la cooperativa nuevo sendero del departamento de Santa Rosa consistió en la determinación de los principales parámetros físicos y químicos que describen la naturaleza de las aguas analizadas.

### 2.4.1. Parámetros físico-químico seleccionados para la caracterización

Los parámetros físico-químicos seleccionados para la caracterización de las aguas utilizadas y su correspondiente uso o significado sanitario y ambiental son los siguientes:

Tabla II. Parámetros de análisis seleccionados para la caracterización

Parámetro	Uso o significado del resultado
<b>Agua para lavado y despulpado del café</b>	
Oxígeno disuelto	Factor que determina la existencia de condiciones aeróbicas o anaeróbicas en un medio particular.
Conductividad Eléctrica	Expresión numérica de la habilidad de un agua para transportar una corriente eléctrica, que depende de la concentración total de sustancias disueltas ionizadas en el agua y de la temperatura a la cual se haga la determinación.
Sólidos disueltos totales	Parámetro que representa la materia que se encuentra disuelta en forma de sales inorgánicas, pequeñas cantidades de materia orgánica y gases disueltos.
Salinidad	Parámetro adimensional usado como medida de la masa de sales disueltas en una masa determinada de solución, calculado a partir de una solución estándar de KCl.
Turbiedad	Expresión de la propiedad o efecto óptico causado por la dispersión e interferencia de los rayos luminosos que pasan a través de una muestra de agua.

Continuación de la tabla II.

Color	Propiedad física del agua que resulta del contacto con materia orgánica como hojas, agujas de coníferas y madera, en diversos estados de descomposición. Está formado por una considerable variedad de extractos vegetales. El color natural existe en el agua principalmente en forma de partículas coloidales con carga negativa. La existencia de color en el agua provoca una renuencia por parte de los consumidores debido a las asociaciones que tienen lugar debido a la misma.
<b>Agua miel generada durante el lavado y despulpado del café y agua miel tratada con hidróxido de calcio</b>	
Demanda química de oxígeno	Parámetro analítico de polución que mide el material orgánico contenido en una muestra líquida mediante oxidación química.
Demanda bioquímica de oxígeno	Medida de la cantidad de oxígeno utilizado por los microorganismos en la estabilización de la materia orgánica biodegradable.
Sólidos sedimentables	Parámetro que se utiliza extensamente para determinar la necesidad y el diseño de tanques primarios de sedimentación en las plantas de procesamiento que emplean el tratamiento biológico.
Sólidos suspendidos	Se emplean para determinar la carga contaminante de las aguas residuales después de la sedimentación primaria.

Continuación de la tabla II.

Sólidos totales	Sólidos disueltos y no disueltos que permanecen como residuo después de la evaporación.
Sólidos totales fijos	Sólidos que representan la cantidad, en mg/l, de materia inorgánica presente.
Sólidos totales volátiles	Sólidos que representan la cantidad, en mg/l, de materia orgánica presente.
Potencial de hidrógeno	Concentración o actividad del ión hidrógeno que sirve para expresar la intensidad de la condición ácida o alcalina de una solución.
Temperatura	Parámetro que afecta directamente las reacciones químicas y las velocidades de reacción, la vida acuática y la adecuación de agua para fines benéficos.
Alcalinidad	Capacidad para neutralizar ácidos y reaccionar con iones hidrógeno.
Acidez	Capacidad para neutralizar bases y reaccionar con iones hidróxilos.
Nitrógeno/Fósforo	Favorecen el crecimiento de vida acuática indeseable y pueden generar contaminación en las aguas subterráneas cuando se vierten al terreno en cantidades excesivas.

Fuente: (Rojas, 2009) & (Crites, et al., 2000).

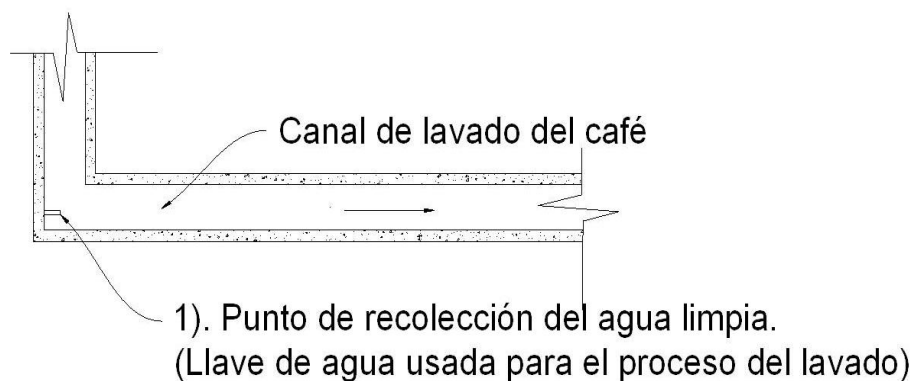
#### 2.4.2. Puntos de recolección de muestras

Los puntos de recolección de muestras de agua para la caracterización del agua empleada para el lavado y despulpado del café y de las aguas residuales producto del procesamiento del café fueron los siguientes:

- Grifo para alimentación del agua empleada para el lavado de los granos de café (punto 1).
- Tubería de entrada al tanque de sedimentación (después del canal de rejillas, punto 2).
- Tanque de descarga del tanque de sedimentación (punto 3).

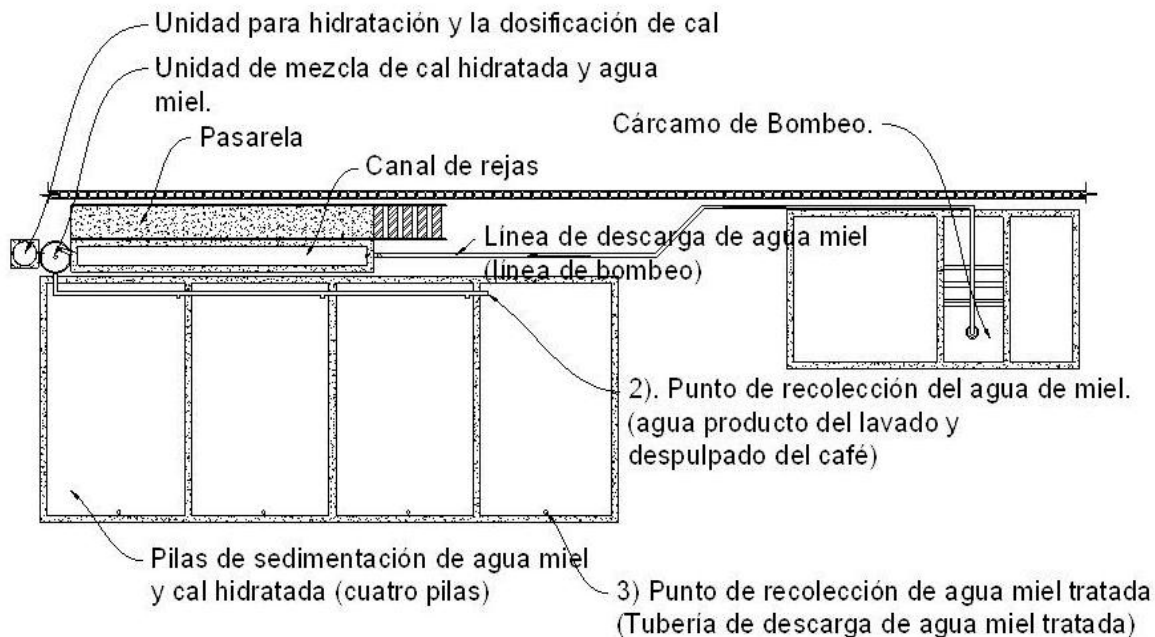
La figura 10 esquematiza los puntos donde se recolectaron las muestras de agua para la realización de las evaluaciones correspondientes a la caracterización de las mismas.

Figura 10. Esquema de puntos de recolección de muestras





Continuación de la figura 10.



Fuente: elaboración propia.

### 2.4.3. Frecuencia del análisis de muestras

La recolección y análisis muestras de aguas mieles para su caracterización se programó los días martes y jueves, en el período comprendido desde 25 de octubre del 2012 hasta el 22 de enero del 2013.

### 2.4.4. Toma de muestras

El procedimiento para la toma de muestras requerido para la caracterización de las aguas empleadas en el procesamiento del fruto del café fue el siguiente:

#### **2.4.4.1. Agua para lavado y despulpado del café**

Las muestras de agua para el lavado y despulpado del fruto del café se tomaron de una llave de chorro del mismo sistema que distribuye el agua para esa actividad. El agua proviene de un pozo profundo ubicado a 140 metros de distancia de las instalaciones del beneficio. Como observación se aclara que el pozo profundo carece de sello sanitario. Se tomará una muestra simple o puntual, esta es representativa del agua original para el tiempo y circunstancias particulares en las que se realiza la captación.

Los recipientes para la colecta de las muestras de agua para los análisis físicos y químicos tendrán un volumen mínimo de 1 litro.

Se siguió el mismo procedimiento para la toma de muestras de agua del lavado y despulpado para los análisis físicos, químicos y bacteriológicos. El procedimiento fue el siguiente:

- A. Se limpió la superficie del chorro con un algodón con alcohol.
- B. Se abrió el chorro y se dejó correr el agua a baja presión, por un minuto.
- C. Se flameó la boca del chorro con la llama de un algodón con alcohol.
- D. Se abrió el chorro y se dejó correr nuevamente agua a baja presión, por un minuto.
- E. Se destapó el recipiente estéril, en el caso de la muestra para el análisis bacteriológico), se tuvo el cuidado de que el tapón no tocara el suelo u otra superficie. Posteriormente a la toma de la muestra para el análisis bacteriológico se tomaron las muestras para los análisis físicos y químicos. Los frascos se purgaron en 3 ocasiones antes de la toma definitiva de la muestra.
- F. Se llenó la botella, dejando un pequeño espacio de aire.

- G. Se cerró el recipiente, teniendo la precaución de que el tapón no tocara ninguna superficie.
- H. Las muestras fueron etiquetadas y colocadas en hielo para su transporte inmediato al laboratorio. Se conservó una temperatura de la muestra de 4 °C.
- I. Los parámetros de oxígeno disuelto, temperatura y pH se midieron en el en el sitio de toma.
- J. Los recipientes para las muestras bacteriológicas estaban debidamente esterilizados y contenían los químicos inhibidores requeridos.

#### **2.4.4.2. Agua miel generada durante el lavado y despulpado del café**

Tipo de muestra: considerando que la composición del agua miel, el día que se realiza el muestreo, es relativamente constante en el tiempo a lo largo del proceso de despulpado y lavado del fruto de café (el beneficio opera a caudal constante y para el día de análisis la cantidad de fruta procesada es fija), en tal sentido se consideró que una muestra simple representaba el volumen total de agua miel descargado por el beneficio. Bajo esta premisa todas las muestras colectadas fueron simples.

Procedimiento de muestreo:

- A. Luego de unos minutos de operación de la bomba, se procedió a llenar dos recipientes de 55 galones, con esto se procuró mantener una mezcla homogénea mientras se realiza la toma de muestra de agua cruda. Con el agua mezclada se llenaron los recipientes plásticos de 0,50 galón de capacidad, previamente etiquetados, se midió el pH, la temperatura y el oxígeno disuelto. Posteriormente las muestras se colocaron en una

hielera para conservarlas a temperatura de 4 °C y preservar la cadena de frío hasta su traslado al laboratorio.

- B. Las muestras de agua de los tanques de sedimentación fueron tomadas en porciones de 300 mililitros de diferentes puntos, hasta completar un volumen total de muestra requerida, por lo se define como una serie de muestras puntuales que se integraron para formar un único volumen mezclado. Con el agua mezclada se llenaron los recipientes plásticos de 0,50 galón de capacidad, previamente etiquetados, se midió el pH, la temperatura y el oxígeno disuelto. Posteriormente las muestras se colocaron en una hielera para conservarlas a temperatura de 4 °C y preservar la cadena de frío hasta su traslado al laboratorio.

#### **2.4.4.3. Agua miel tratada con hidróxido de calcio**

Tipo de muestra: se consideró que una muestra simple representaba el volumen total de agua tratada en el período de tiempo en que se realiza el tratamiento. Bajo esta premisa todas las muestras colectadas fueron simples.

Procedimiento de muestreo:

- A. Se colectaron muestras de volumen necesario para realizar los análisis de los parámetros de control en la fase experimental.
- B. Las muestras se trasladaron de forma inmediata para su análisis en laboratorio, se colocaron en una hielera para conservarlas a temperatura de 4 °C y preservar la cadena de frío hasta su traslado al laboratorio.

## **2.5. Propuestas de tratamiento evaluadas**

Las propuestas de tratamiento evaluadas son los siguientes modelos experimentales:

- A. Lecho de roca caliza para el ajuste del potencial de hidrógeno.
- B. Laguna facultativa para la remoción de la carga contaminante.

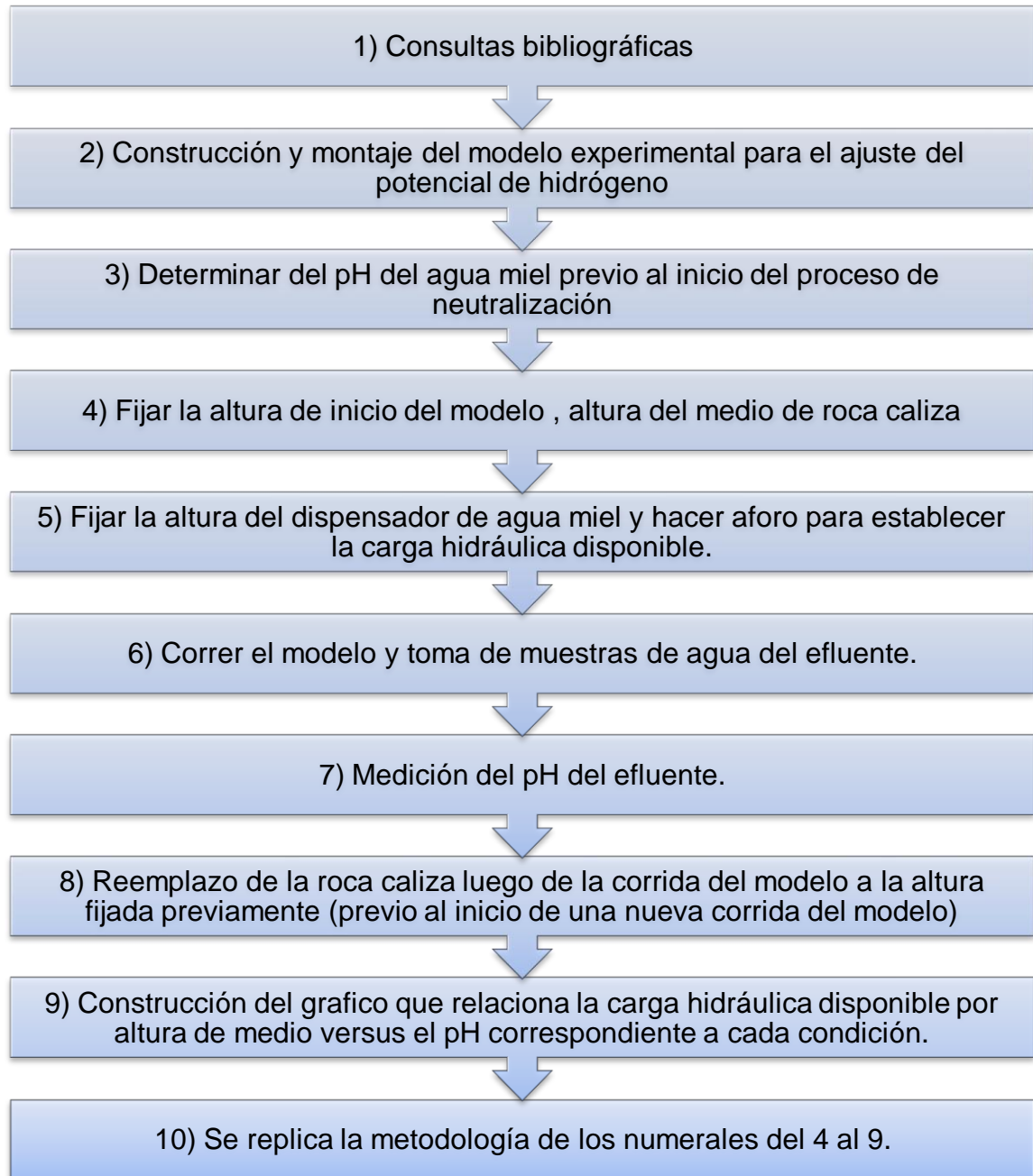
### **2.5.1. Ajuste del potencial de hidrógeno del agua miel mediante lechos de contacto de roca caliza**

Para el ajuste del potencial de hidrógeno del agua miel, previo a iniciar un tratamiento biológico, se propone evaluar de manera experimental un lecho de roca caliza de flujo ascendente. Con el método experimental se busca monitorear el agua miel después de hacerla pasar por un lecho de roca caliza, a una velocidad ascensional controlada y con una altura de medio de roca caliza fijo. El objeto es verificar si es posible ajustar el potencial de hidrógeno del agua miel con acidez de origen orgánico utilizando lechos de roca caliza.

Este modelo de ajuste de potencial de hidrógeno de forma experimental se justifica debido a que el agua miel cruda posee un potencial de hidrógeno de aproximadamente 4,3 unidades de pH. En ese sentido se debe neutralizar el potencial de hidrógeno del sustrato previo a la descarga y tratamiento para la reducción de la carga orgánica soluble, en base a un proceso biológico.

La siguiente figura muestra el diagrama de flujo de las actividades de un proceso de ajuste del potencial de hidrógeno:

Figura 11. **Diagrama de flujo de las actividades de un proceso de ajuste del potencial de hidrógeno**



Fuente: elaboración propia.

El proceso de neutralización de la acidez del agua significa, en términos generales, hacer pasar el fluido por un lecho de roca caliza, procurando una velocidad de flujo o carga hidráulica tal que, al contacto del líquido ácido con la superficie de la roca caliza se produzca una reacción que modifique el pH obteniendo un líquido de menor acidez, neutro o alcalino.

Es necesario controlar la velocidad ascensional del líquido en el lecho de roca caliza, por lo que se propone un modelo de flujo vertical ascendente.

La altura de carga del modelo se obtiene al ubicar el dispensador de agua miel a una altura suficiente para vencer las pérdidas por fricción. Se debe procurar un nivel de agua constante en el dispensador, para no provocar variaciones de flujo y de carga hidráulica en el medio de contacto.

#### **2.5.1.1. Construcción y montaje del modelo experimental para el ajuste del potencial de hidrógeno**

El modelo de ajuste del potencial de hidrógeno está conformado por un recipiente dispensador del fluido a tratar, mangueras (mangueras plásticas y adaptadores) y el lecho de contacto de flujo vertical de tipo ascensional. A continuación se describen cada uno de ellos:

- A. Recipiente dispensador: es un elemento que posee un volumen de 5 galones, al cual se le ha adaptado una llave de paso para regular la salida del fluido. Está conectado por una manguera a la tubería de  $\frac{1}{2}$ " de diámetro ubicada al centro del lecho de contacto.

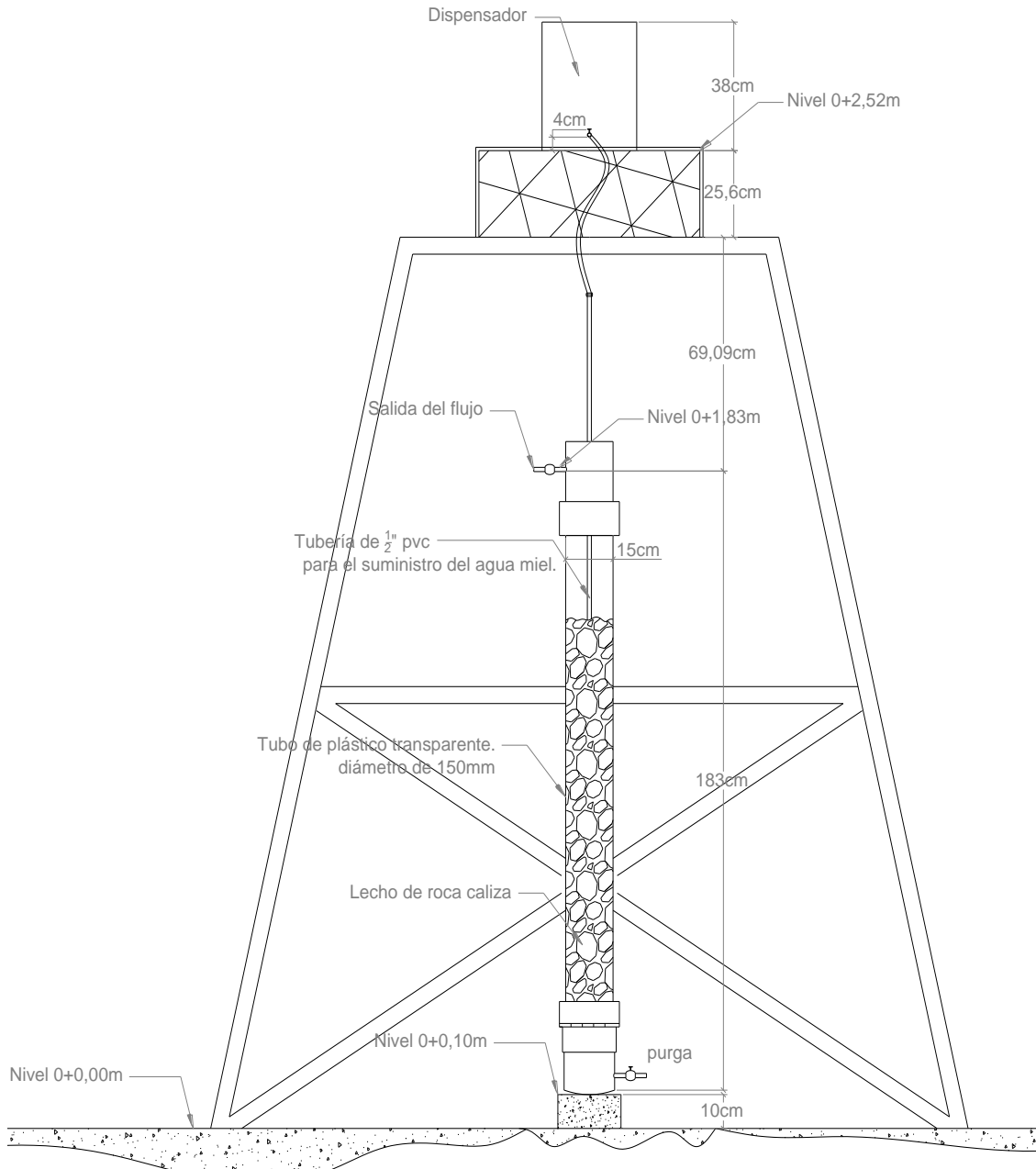
B. Lecho de contacto: éste dispositivo consiste en:

- Un cilindro plástico transparente de 2 metros de altura, 150 milímetros de diámetro interno y provisto de una salida de flujo ubicada en la parte inferior para la purga de flujos, a la cual se le puede adaptar una manguera transparente para hacer verificaciones de carga hidráulica en el modelo. En la parte superior del cilindro se ubica un dispositivo por donde fluye el agua después del contacto con la roca caliza.
- Una tubería de PVC, de ½ pulgada de diámetro, ubicada en el centro del lecho. La función de esta tubería es alimentar al lecho con líquido desde el recipiente dispensador. Esta tubería descarga el líquido en el fondo del lecho, lo que propicia un flujo vertical ascendente dentro del lecho de contacto.
- Roca caliza: el lecho está formado por un volumen de roca caliza de granulometría de una pulgada, dispuesto de tal forma que permita que entre sus espacios fluya el agua miel y, consecuentemente, se genere el contacto de ésta con la superficie de la roca caliza.

La siguiente figura muestra el esquema correspondiente al montaje del modelo de ajuste del potencial de hidrógeno:



Figura 12. Esquema del montaje del lecho de roca caliza



Fuente: elaboración propia.

### **2.5.1.2. Determinación del potencial de hidrógeno del agua miel previo al proceso de ajuste**

Previo a la disposición del agua miel al contacto con el lecho de roca caliza se tomó una muestra representativa homogenizada de agua miel y se mide el pH. Este valor representa el potencial de hidrógeno del agua previo al proceso de ajuste mediante el contacto de la misma con el lecho de roca caliza.

### **2.5.1.3. Determinación de la altura del medio de roca caliza y la carga hidráulica del modelo**

Se fija una altura de medio de roca caliza a fin de realizar diferentes pruebas de carga hidráulica a una misma altura y volumen de medio de contacto. El área transversal del lecho se mantiene constante para cualquier condición o prueba, por lo que únicamente se debe controlar la altura de medio y la carga hidráulica a fin de obtener datos de pH característicos de estas condiciones. Se puede iniciar con valores de altura de medio igual 0,30 metros y variarla hasta alturas convenientes para realizar estudios experimentales.

La válvula de control del dispensador y el nivel de agua en el mismo se mantienen en una posición fija a fin de evitar fluctuaciones no controladas de caudal afluente al lecho de roca.

La carga hidráulica se calcula al dividir el caudal del efluente del lecho entre el área transversal. Para tal efecto se realizan aforos para establecer la carga que corresponde a cada caudal afluente al lecho.

#### **2.5.1.4. Inicio de operaciones del modelo de ajuste del potencial de hidrógeno y toma de muestras del efluente**

Luego de fijar la altura del lecho y establecer una carga hidráulica de inicio, se da inicio a la operación del modelo haciendo fluir el agua miel a través del lecho y colectando muestras para determinar el pH. Las muestras colectadas son analizadas a fin de determinar las variaciones de pH inmediatamente después de su contacto con la roca caliza, estas mediciones son cotejadas con las mediciones de la muestra de agua miel que no fue sometida al contacto con el lecho de roca caliza.

A una misma altura se buscará aumentar la carga hidráulica a fin de determinar los efectos de esta variable en los cambios del pH del agua miel.

Al finalizar todas las pruebas de carga hidráulica a una misma altura de lecho, se procederá a cambiar el mismo a efectos de iniciar nuevas pruebas a diferentes alturas de lecho. A cada altura de lecho corresponderá un rango de cargas hidráulicas y un único medio.

#### **2.5.1.5. Parámetros de control seleccionados**

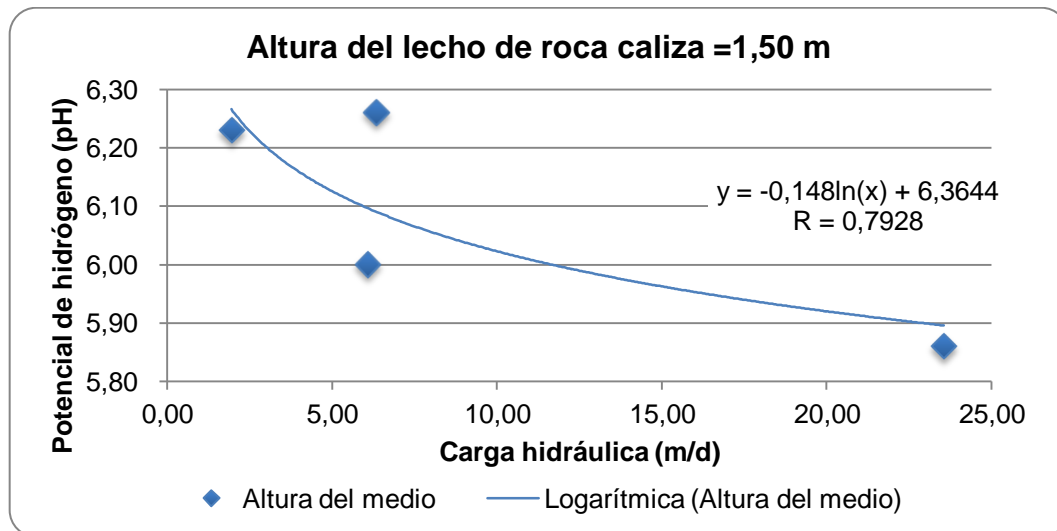
Se establece como único parámetro de control el pH, con el que se busca determinar la eficiencia del lecho de roca caliza en el proceso de ajuste de pH. El monitoreo del pH se realiza a partir de la toma de muestra del efluente del modelo de contacto y se busca evaluar el comportamiento del pH del agua que pasa por el lecho de roca caliza y compararlo con el comportamiento del pH del agua miel que no es expuesta a la superficie de la roca caliza.

### 2.5.1.6. Construcción del gráfico: carga hidráulica disponible versus potencial de hidrógeno

A cada altura de medio le corresponde un rango de cargas ensayadas y los valores de pH resultantes. Con los datos disponibles se construye un gráfico que relacione la carga hidráulica con el pH para cada altura de medio. Este gráfico generará un número de curvas iguales al número de alturas de medio ensayados y para cada una corresponderá una tendencia y su ecuación característica.

Los datos obtenidos a partir de este gráfico pueden ser utilizados para el diseño de lechos de ajuste de potencial de hidrógeno a partir de un pH requerido.

Figura 13. Ejemplo de gráfico de relación entre carga hidráulica versus pH, para una altura de lecho determinada

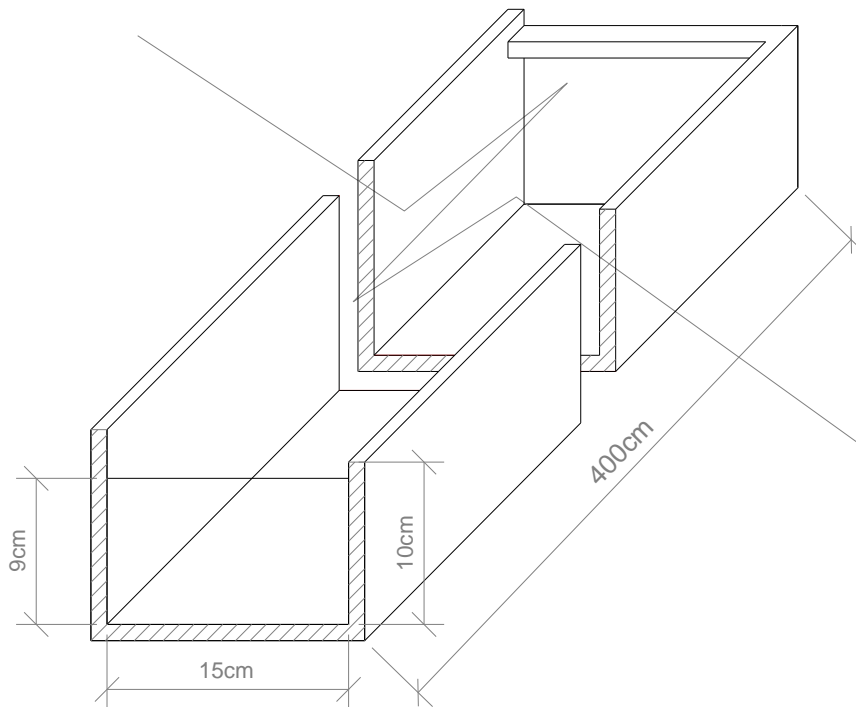


Fuente: elaboración propia.

### 2.5.2. Tratamiento biológico mediante el uso de un modelo de laguna facultativa a escala de laboratorio

Para el tratamiento biológico de las aguas mieles se propuso el uso de un modelo lagunar a escala de laboratorio, en el cual se realizaron descargas de agua miel cruda, de volumen y carga contaminante previamente conocida, monitoreando los cambios de  $DBO_5$  en mezcla (agua miel y agua de la laguna) hasta alcanzar una retención hidráulica de seis (6) días continuos.

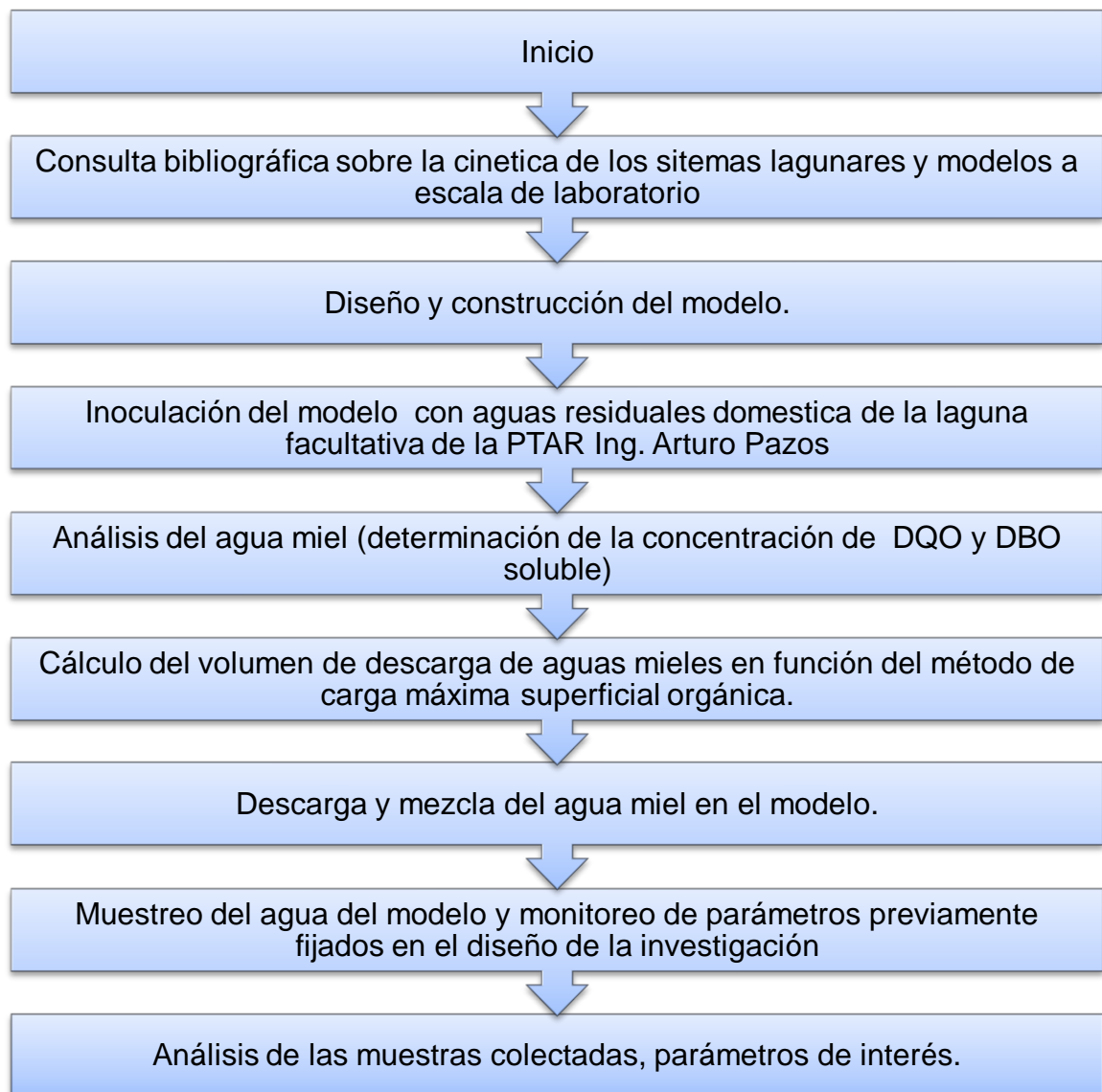
Figura 14. Esquema del canal utilizado como modelo lagunar a escala de laboratorio



Fuente: elaboración propia.

En la figura 15 se muestra el diagrama de flujo de las actividades desarrolladas en el modelo biológico experimental.

Figura 15. **Diagrama de flujo de las actividades del tratamiento biológico**



Fuente: elaboración propia.

### **2.5.2.1. Diseño y construcción del modelo biológico**

El detalle correspondiente al diseño y construcción del modelo biológico es el siguiente:

#### **2.5.2.1.1. Diseño**

Basado en la metodología de diseño de lagunas facultativas por carga orgánica máxima superficial por el método de radiación solar y considerando el valor de la carga orgánica del agua miel, medida en términos de  $DBO_5$  soluble (mg/l), se determina la cantidad de agua miel máxima que es posible descargar al modelo para realizar el tratamiento biológico.

Previamente se fijan las dimensiones largo y ancho del modelo biológico. La altura de agua se fija al inicio de la corrida del modelo, este nivel varía debido a la evaporación del agua, aproximadamente se reduce en un centímetro diario.

El método de radiación solar está basado en la relación que existe entre la radiación solar, la síntesis de algas y el oxígeno producido por éstas. El proceso de diseño es el siguiente:

- A. Se determina de la carga orgánica del agua miel.
- B. Se fija la altura de agua, igual a 8 centímetros, con el objeto de tener un volumen de agua en el modelo igual a 48 litros.
- C. Se calcula la carga diaria máxima diaria (kg de  $DBO_5$ /día) utilizando los datos de insolación promedio de 10 años, correspondiente a la zona donde se ubica el modelo experimental, la eficiencia de producción de

oxígeno de las algas (3% ) y el área superficial disponible del modelo. La ecuación para determinar la carga máxima es la siguiente:

$$CS_m = \frac{(Radiación\ solar, KJ/ha) \times (Eficiencia\ de\ conversión) \times (1,55KgO_2/Kg\ algas)}{24\ 000\ KJ/Kg\ algas\ producidas}$$

- D. Se determina el volumen total de agua miel que puede ser descargado haciendo la división entre el valor de la DBO<sub>5</sub> soluble de la descarga y de la carga diaria máxima del modelo.

#### **2.5.2.1.2. Inoculación del sistema**

Previo al inicio de operación del modelo (descarga del agua miel) se realiza la inoculación del mismo por medio de la descarga de agua de una de las lagunas de estabilización de aguas residuales domésticas que está en operación en la planta de tratamiento de aguas residuales Ing. Arturo Pazos. El objetivo de esta fase es reducir el tiempo de estabilización del modelo.

#### **2.5.2.1.3. Cálculo del volumen de descarga de aguas mieles**

El volumen de la descarga está determinado por la carga orgánica máxima superficial y la carga de DBO<sub>5</sub> soluble del agua miel. El volumen será igual a la división de la carga orgánica soluble entre la carga superficial máxima. El objeto de esta fase es controlar el volumen de descarga y la concentración de la misma.



#### **2.5.2.1.4. Descarga y mezcla del agua miel en el modelo**

La descarga del agua miel al modelo se realiza de tal forma que se distribuya de manera homogénea en toda la superficie del modelo, se procura realizar una mezcla completa del agua miel y el agua del modelo, previamente inoculado.

#### **2.5.2.1.5. Muestreo y análisis del agua del modelo**

Cada día de operación se realiza un muestreo compuesto del agua del modelo, el mismo es mezclado y homogenizado por un tiempo determinado en un agitador mecánico. Posteriormente la muestra se filtra previo a realizar los análisis pertinentes. Cada día se colecta un promedio de 200 mililitros de agua como muestra representativa del agua del modelo.

#### **2.5.2.2. Parámetros de control seleccionados**

Los parámetros de control seleccionados son los que, a consideración de los autores, poseen un significado técnico en el control del proceso y la evaluación de resultados de eficiencia del modelo biológico. Los parámetros de control son los siguientes: potencial de hidrógeno, oxígeno disuelto en agua de mezcla, carga orgánica en términos de DBO<sub>5</sub> soluble.

- Potencial de hidrógeno: concentración o actividad del ión hidrógeno que sirve para expresar la intensidad de la condición ácida o alcalina de una solución. Su importancia reside en que en el tratamiento de aguas residuales domesticas e industriales mediante procesos biológicos, el pH

se debe mantener en un margen favorable para los microorganismos que intervienen.

- Oxígeno disuelto: factor que determina la existencia de condiciones aeróbicas o anaeróbicas en un medio particular. La importancia del control del oxígeno disuelto en la mezcla es determinar si existe la cantidad de oxígeno disponible tal que permita desarrollar un proceso de respiración de oxígeno o proceso aerobio, en donde el oxígeno libre es el único aceptor final de electrones. El oxígeno es reducido y el carbono es oxidado, al igual que la materia orgánica o inorgánica. La masa biológica necesaria para la correcta operación del modelo biológico está relacionada con la cantidad de oxígeno disponible en el medio.
- Carga orgánica medida como mg/l de DBO<sub>5</sub> soluble: se define la DBO<sub>5</sub> como la medida de la cantidad de oxígeno utilizado por los microorganismos en la estabilización de la materia orgánica biodegradable. La importancia de este parámetro reside en que es ampliamente utilizado para medir la eficacia de los procesos de tratamiento de aguas residuales (domésticas e industriales biológicamente tratables).



### **3. RESULTADOS EXPERIMENTALES**

El detalle de los resultados experimentales obtenidos en el desarrollo de la presente investigación es el siguiente:

#### **3.1. Medición de caudal**

Dada la naturaleza de la operación del beneficio del café, donde se realiza una descarga para desecho de agua después de un ciclo de lavado y despulpado de fruto utilizando un volumen de agua constante, y considerando que para la descarga de las aguas mieles se requiere de un sistema de bombeo, se calculó que el caudal de descarga es constante durante todo el tiempo de operación. Para tal efecto se realizaron aforos volumétricos determinando que el caudal de descarga del sistema de bombeo para el desecho de las aguas mieles es igual a  $0,013m^3/segundo$  o  $13,3 l/segundo$ .

##### **3.1.1. Estructura y procedimiento de medición del caudal por el método volumétrico**

Debido a la ausencia de una estructura especial para realizar la medición de caudales y considerando la conveniencia de la estructura rectangular de la recámara de rejillas, se consideró ésta como la estructura ideal para realizar la medición de volúmenes de agua a efectos de realizar aforos volumétricos de control de descarga de la bomba, el procedimiento se describe a continuación:

- A. Se realizaron mediciones de las caras internas de la recámara de rejillas.
- B. Se realizó una medición de tiempo durante la operación de bombeo a fin de fijar una altura de agua, en varias ocasiones.
- C. Se procedió a calcular los volúmenes correspondientes a la altura fijada.
- D. El cálculo del caudal de bombeo es el resultado de dividir el volumen de agua en el canal entre el tiempo transcurrido hasta alcanzar la altura de agua fijada.

Tabla III. **Resumen de cálculo de caudal de bombeo**

Medición #	Dimensiones del Canal (m)			Volumen (m <sup>3</sup> )	Tiempo de llenado			Caudal (m <sup>3</sup> /s)
	Ancho	Longitud	Altura (de llenado)*		Min	Seg	Total (Seg)	
1	0,387	6,210	0,400	0,961	1	20,70	80,700	0,012
2	0,387	6,210	0,400	0,961	1	7,34	67,340	0,014
3	0,387	6,210	0,500	1,202	1	27,14	87,140	0,014
Caudal Promedio								0,013
Obtenido (l/s)								13,326

Fuente: elaboración propia.

### **3.2. Caracterización de las aguas utilizadas en el procesamiento del café**

Los resultados experimentales obtenidos para la caracterización de las aguas utilizadas en el procesamiento del café son las siguientes:

#### **3.2.1. Agua para lavado y despulpado del café**

El resumen de las características promedio del agua analizada es:

Tabla IV. **Características físicas, agua para lavado y despulpado del café**

Descripción	Unidad	Valor
Oxígeno disuelto	mg/l	6,37
Conductividad eléctrica	µs/cm	182,60
Sólidos disueltos totales	mg/l	97
Salinidad	%	0
Turbiedad	UTN	3,94
Color	U.C.	8
Potencial de hidrógeno	Unidad pH	7,29
Material flotante	-	Ausente
Aspecto y olor	-	No objetable

Fuente: elaboración propia.

Tabla V. **Contenido de nutrientes, agua para lavado y despulpado del café**

Descripción	Unidad	Valor
Nitrato	mg/l	38,10
Nitrito	mg/l	0,030
Amoniaco	mg/l	0,05
Fosfatos	mg/l	0,60
Hierro	mg/l	0,51
Manganeso	mg/l	1,152

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Características químicas, agua para el lavado y despulpado del café**

Descripción	Unidad	Valor
Alcalinidad	mg/l	91
Cloruros	mg/l	7
Dureza	mg/l	67
Dureza de calcio	mg/l	40
Dureza de magnesio	mg/l	27

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Características bacteriológicas, agua para el lavado y despulpado del café**

Descripción	Unidad	Valor
Prueba presuntiva	NMP/100 cm <sup>3</sup>	838
Prueba confirmativa		
Coliformes totales	NMP/100 cm <sup>3</sup>	571
Coliformes fecales	NMP/100 cm <sup>3</sup>	107

Fuente: elaboración propia.

### **3.2.2. Agua residual generada durante el lavado y despulpado del fruto del café (agua miel cruda)**

El resumen de las características promedio del agua analizada es:

Tabla VIII. **Características físicas, agua miel cruda**

Descripción	Unidad	Valor
Oxígeno disuelto	mg/l	0,32
Temperatura	°C	25,0
Potencial de hidrógeno	Unidad pH	4,33
Sólidos sedimentables	cm <sup>3</sup> /l/h	37
Sólidos suspendidos	mg/l	5 423
Sólidos totales	mg/l	13 690
Sólidos fijos	mg/l	2 416
Sólidos volátiles	mg/l	9 187

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Contenido de nutrientes, agua miel cruda**

Descripción	Unidad	Valor
Nitrato	mg/l	3 999
Nitrito	mg/l	31
Amoniaco	mg/l	180
Fosfatos	mg/l	227

Fuente: elaboración propia.



Tabla X. **Características químicas, agua miel cruda**

Descripción	Unidad	Valor
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/l	31 418
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO <sub>5</sub> )	mg/l	21 773
Índice de biodegradabilidad (DBO <sub>5</sub> /DQO)	mg/l	0,68
Alcalinidad	mg/l CaCO <sub>3</sub>	549
Acidez	mg/l CaCO <sub>3</sub>	3 620

Fuente: elaboración propia.

### 3.2.3. Agua miel tratada con hidróxido de calcio

El resumen de las características promedio del agua analizada es:

Tabla XI. **Características físicas, agua miel tratada con hidróxido de calcio**

Descripción	Unidad	Valor
Oxígeno disuelto	mg/l	0,30
Temperatura	°C	23,30
Potencial de hidrógeno	Unidad pH	5,58
Sólidos sedimentables	cm <sup>3</sup> /l/h	43
Sólidos suspendidos	mg/l	1 067
Sólidos totales	mg/l	5 658
Sólidos fijos	mg/l	1 626
Sólidos volátiles	mg/l	3 580

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Contenido de nutrientes, agua miel tratada con hidróxido de calcio**

Descripción	Unidad	Valor
Nitrato	mg/l	2 596
Nitrito	mg/l	18
Amoniaco	mg/l	137
Fosfatos	mg/l	259

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Características químicas, agua miel tratada con hidróxido de calcio**

Descripción	Unidad	Valor
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/l	17 767
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO <sub>5</sub> )	mg/l	10 021
Índice de biodegradabilidad (DBO <sub>5</sub> /DQO)	mg/l	0,59
Alcalinidad	mg/l CaCO <sub>3</sub>	2 466
Acidez	mg/l CaCO <sub>3</sub>	1 385

Fuente: elaboración propia.

### 3.3. Valoraciones sobre la eficiencia del tratamiento actual

El resumen de las eficiencias de remoción obtenidas mediante el tratamiento actual evaluado es:

Tabla XIV. **Eficiencias de remoción obtenidas en el tratamiento actual**

Descripción	Unidad	Valor
Eficiencia de remoción de sólidos suspendidos (mg/l)	%	81,60
Diferencial de ajuste de potencial de hidrógeno	Unidad de pH	1,25
Eficiencia de remoción de DBO <sub>5</sub> (mg/l)	%	43,20
Eficiencia de remoción de DQO (mg/l)	%	41,25

Fuente: elaboración propia.

### **3.4. Propuestas de tratamiento evaluadas**

Los resultados obtenidos mediante las propuestas de tratamiento evaluadas son los siguientes:

#### **3.4.1. Ajuste del potencial de hidrógeno mediante el modelo de lecho de contacto de roca caliza**

El resumen de los resultados obtenidos en las evaluaciones es:

Tabla XV. **Carga hidráulica y potencial de hidrógeno para diferentes alturas de lecho de roca caliza**

Fecha	Altura del medio	Carga hidráulica, Q/A (m/d)	pH inicial	pH final	$\Delta$ pH
13/02/2013	0,87	S.R.	4,83	7,13	2,30
13/02/2013	0,87	S.R.	4,83	7,43	2,60
19/02/2013	0,50	160,83	4,93	5,88	0,95
19/02/2013	1,00	57,41	4,93	6,25	1,32
19/02/2013	1,50	S.R.	4,93	6,18	1,25
25/02/2013	1,50	23,56	5,47	5,86	0,39
25/02/2013	1,50	6,07	5,47	6,00	0,53
25/02/2013	1,00	107,94	5,47	5,76	0,29
25/02/2013	1,00	41,52	5,47	6,12	0,65
25/02/2013	1,00	18,95	5,47	6,11	0,64
26/02/2013	1,00	106,24	4,96	5,86	0,90
26/02/2013	1,50	6,33	4,96	6,26	1,30
26/02/2013	1,50	1,94	4,96	6,23	1,27
26/02/2013	1,83	9,33	4,96	6,05	1,09
26/02/2013	1,83	7,68	4,96	6,03	1,07
Valores promedio		45,65	5,13	6,14	1,02

S.R. = Sin registro

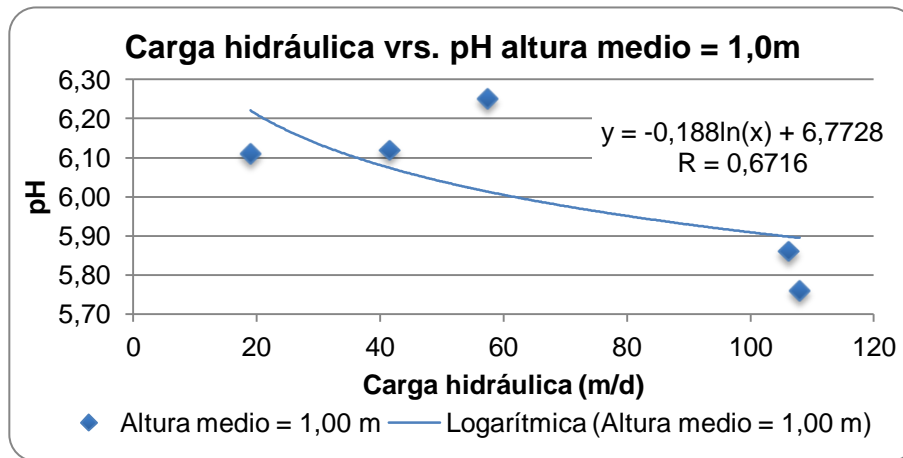
Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. **Carga hidráulica y pH para lechos de roca caliza de 1,00 m**

Fecha	Altura del medio	Carga hidráulica, Q/A (m/d)	pH inicial	pH final	Δ pH
19/02/2013	1,00	57,41	4,93	6,25	1,32
25/02/2013	1,00	107,94	5,47	5,76	0,29
25/02/2013	1,00	41,52	5,47	6,12	0,65
25/02/2013	1,00	18,95	5,47	6,11	0,64
26/02/2013	1,00	106,24	4,96	5,86	0,90

Fuente: elaboración propia.

Figura 16. **Carga hidráulica y pH para lechos de roca caliza de 1,00 m**



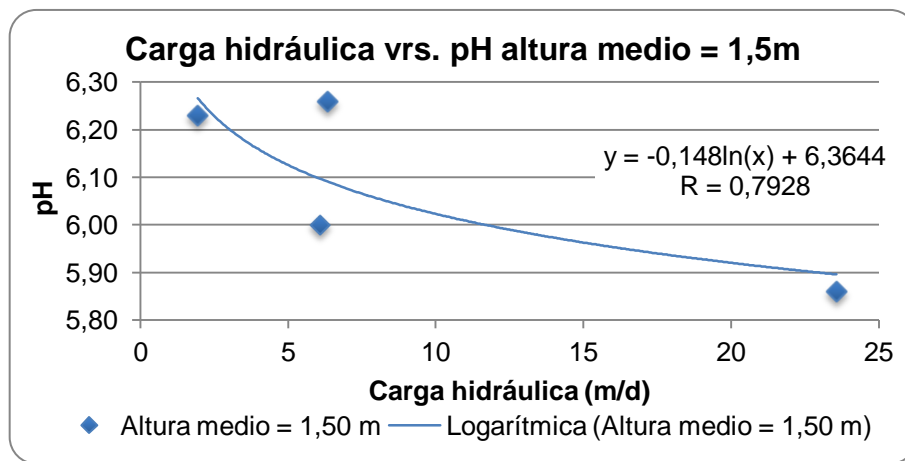
Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. **Carga hidráulica y pH para lechos de roca caliza de 1,50 m**

Fecha	Altura del medio	Carga hidráulica, Q/A (m/d)	pH inicial	pH final	Δ pH
25/02/2013	1,50	23,56	5,47	5,86	0,39
25/02/2013	1,50	6,07	5,47	6,00	0,53
26/02/2013	1,50	6,33	4,96	6,26	1,30
26/02/2013	1,50	1,94	4,96	6,23	1,27

Fuente: elaboración propia.

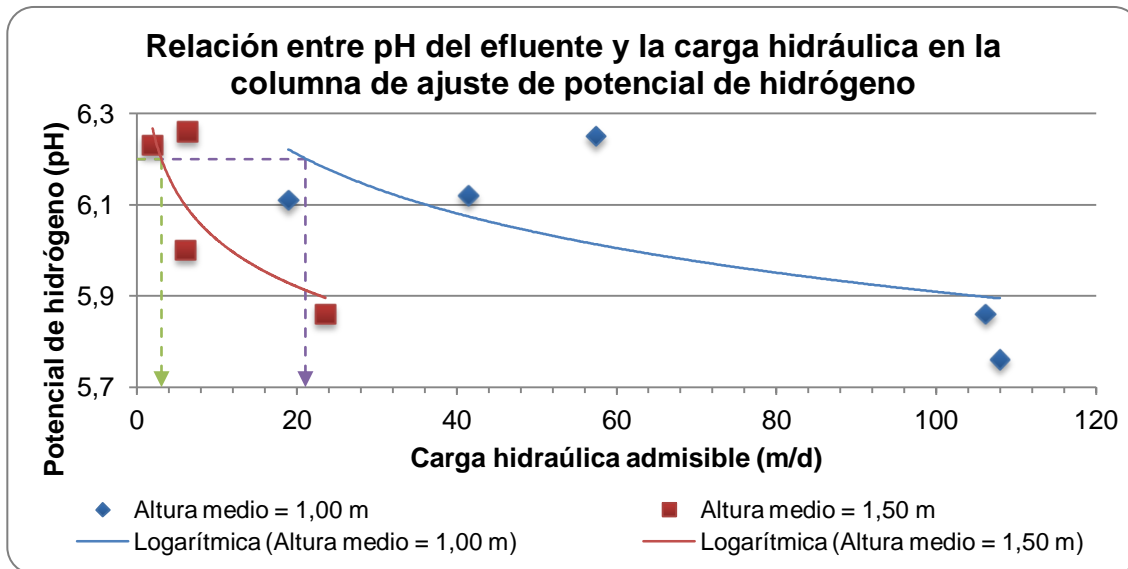
Figura 17. **Carga hidráulica y pH para lechos de roca caliza de 1,50 m**



Fuente: elaboración propia.

La relación entre el potencial de hidrógeno y la carga hidráulica en la columna de ajuste de potencial de hidrógeno es la siguiente:

Figura 18. **Potencial de hidrógeno vrs. Carga hidráulica admisible en la columna de ajuste de potencial de hidrógeno<sup>1</sup>**



Fuente: elaboración propia.

Los valores correspondientes a la obtención de un pH de 6,2 para cada una de las diferentes alturas de lecho de roca caliza analizadas son los siguientes:

<sup>1</sup> Los valores de correlación entre el potencial de hidrógeno y la carga máxima admisible para las alturas de medio de 1,00 m y de 1,50 m pueden observarse en la Figura 16 y la Figura 17 respectivamente.

Tabla XVIII. **Carga hidráulica admisible para pH = 6,2 en los lechos de roca caliza**

Altura de medio	Ecuación	pH	Carga hidráulica admisible (m/d)
1,00 m	$y = -0,188\ln(x) + 6,7728$	6,20	21,050
1,50 m	$y = -0,148\ln(x) + 6,3644$	6,20	3,037

Fuente: elaboración propia.

### 3.4.2. Tratamiento biológico mediante el uso del modelo de laguna facultativa a escala de laboratorio

El resumen de la eficiencia de remoción de la carga orgánica en las evaluaciones del modelo de laguna facultativa analizado es:



Tabla XIX. **Resumen de eficiencia de remoción de carga orgánica de las evaluaciones del modelo de laguna facultativa**

Descripción	N° de evaluación del modelo			
	1	3	4	5
Geometría	Rectangular	Rectangular	Rectangular	Circular
Área superficial disponible (m <sup>2</sup> )	0 ,60	0 ,60	0 ,60	0 ,14
Carga inicial de la mezcla en el modelo (mg/l de DBO <sub>5</sub> )	949 ,03	1 178 ,50	605 ,62	943 ,42
Relación carga DBO soluble (DBO <sub>5</sub> ) /área superficial (mg/l /m <sup>2</sup> )	1 581 ,71	1 964 ,17	1 009 ,37	6 974 ,56
Tiempo de retención hidráulica (día)	6	6	6	6
Carga final de la mezcla en el modelo (mg/l de DBO <sub>5</sub> )	501 ,39	248 ,45	250 ,00	505 ,00
Degradación diaria de DBO <sub>5</sub> soluble (mg/l-día)	74 ,61	155 ,01	59 ,27	73 ,07
Eficiencia experimental del sistema (remoción de DBO <sub>5</sub> soluble)	47 ,17%	78 ,92%	58 ,72%	46 ,47%
Retención hidráulica para obtener el 70% de remoción de DBO <sub>5</sub> soluble (día)	no aplica*	5 ,13	4 ,19	7 ,99
Retención hidráulica para obtener el 70% de remoción de DBO <sub>5</sub> soluble (horas)	no aplica*	123 ,00	100 ,56	191 ,76

\*La proyección de la eficiencia del modelo experimental no llega al 70% de remoción de DBO<sub>5</sub> soluble basada en la ecuación que describe la relación tiempo de retención – eficiencia de remoción de DBO<sub>5</sub>.

Fuente: elaboración propia.

## 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El análisis de los resultados obtenidos durante el desarrollo de la presente investigación es el siguiente:

### 4.1. Caracterización de las aguas utilizadas en el procesamiento del café

Los resultados de la caracterización de las aguas utilizadas en el procesamiento del café son los siguientes:

#### 4.1.1. Agua para lavado y despulpado del café

Los datos presentados en esta sección corresponden a las muestras de agua empleada para el lavado y el despulpado del café.

Tabla XX. **Características físicas, agua para lavado y despulpado del café**

Muestra	Oxígeno disuelto (mg/l)	Conductividad eléctrica (µs/cm)	Sólidos disueltos totales (mg/l)	Salinidad (%)	Turbiedad (UTN)	Color (U,C,)	Potencial de hidrógeno
01/02/2013	5,53	111,8	59	0	1,99	N/R	7,56
05/02/2013	7,81	222	117	0	7,73	12	7,30
12/02/2013	5,77	214	114	0	2,10	4	7,00

N/R = Análisis de laboratorio no realizado

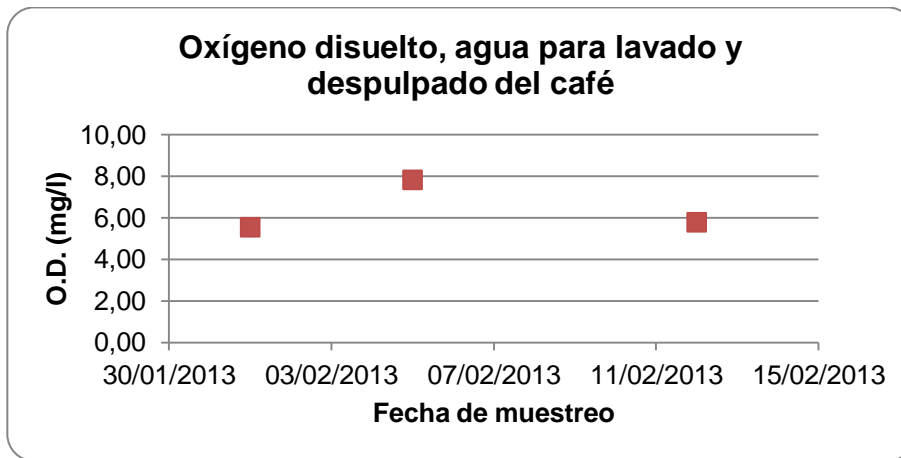
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. **Otros criterios de calidad, agua para lavado y despulpado del café**

Muestra	Material flotante	Aspecto y olor
01/02/2013	Ausente	No objetable
05/02/2013	Ausente	No objetable
12/02/2013	Ausente	No objetable

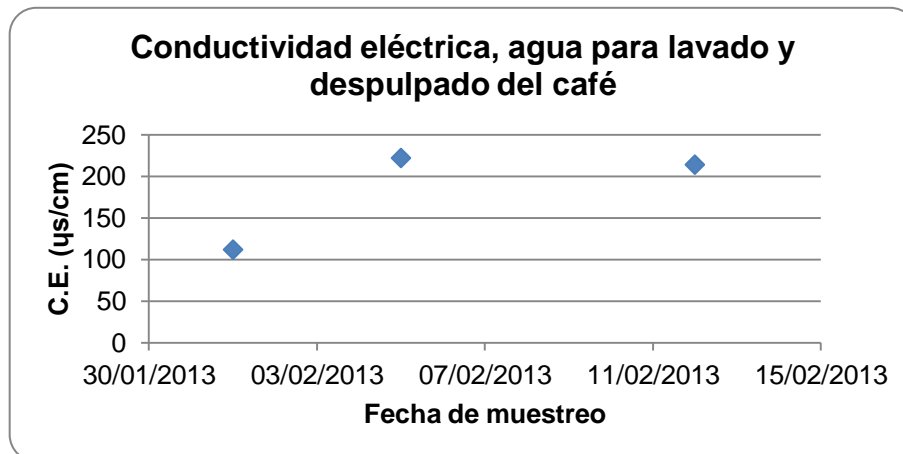
Fuente: elaboración propia.

Figura 19. **Oxígeno disuelto del agua para lavado y despulpado del café**



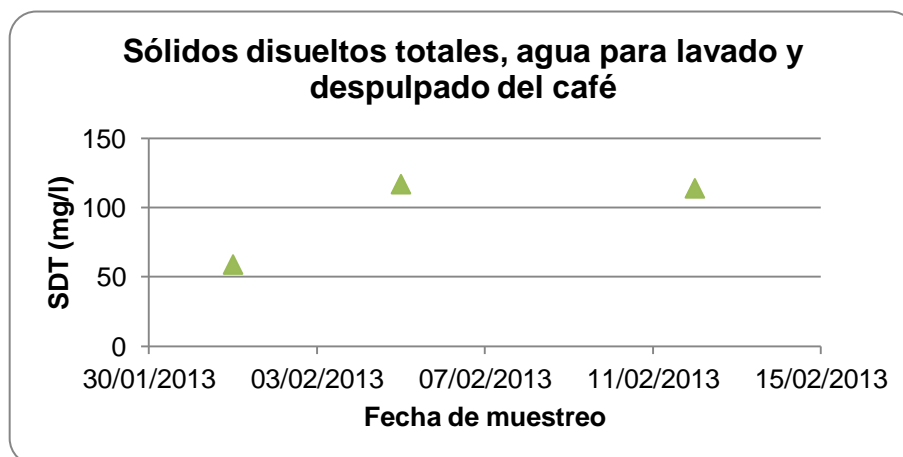
Fuente: elaboración propia.

Figura 20. **Conductividad eléctrica, agua lavado y despulpado del café**



Fuente: elaboración propia.

Figura 21. **Sólidos disueltos totales, agua lavado y despulpado del café**



Fuente: elaboración propia.

Figura 22. **Turbiedad del agua para lavado y despulpado del café**



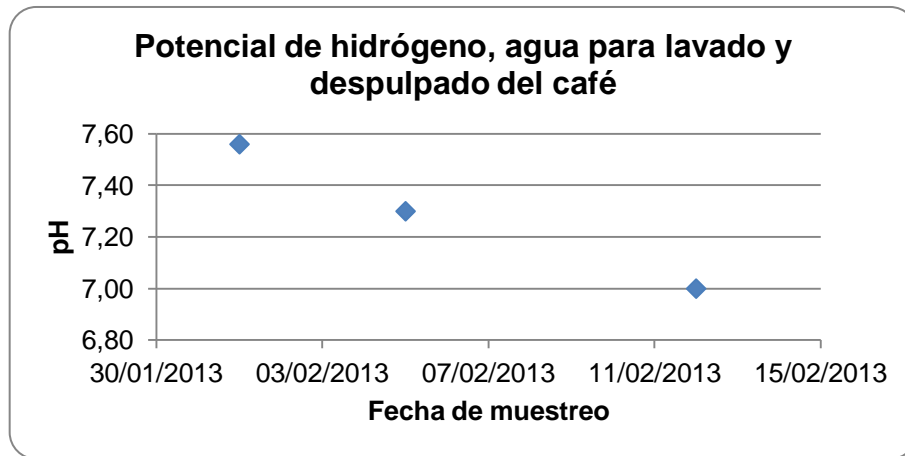
Fuente: elaboración propia.

Figura 23. **Color en el agua para lavado y despulpado del café**



Fuente: elaboración propia.

Figura 24. **Potencial de hidrógeno, agua para lavado y despulpado de café**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XXII. **Nutrientes en el agua para el lavado y despulpado del café**

Descripción de muestra	Nutrientes (mg/l)					
	Nitrato	Nitrito	Amoniaco	Fosfatos	Hierro	Manganeso
01/02/2013	11,0	0,063	N/D	0,350	0,220	2,160
05/02/2013	88,0	0,007	N/D	0,650	0,870	1,080
12/02/2013	15,4	0,020	0,049	0,800	0,440	0,216

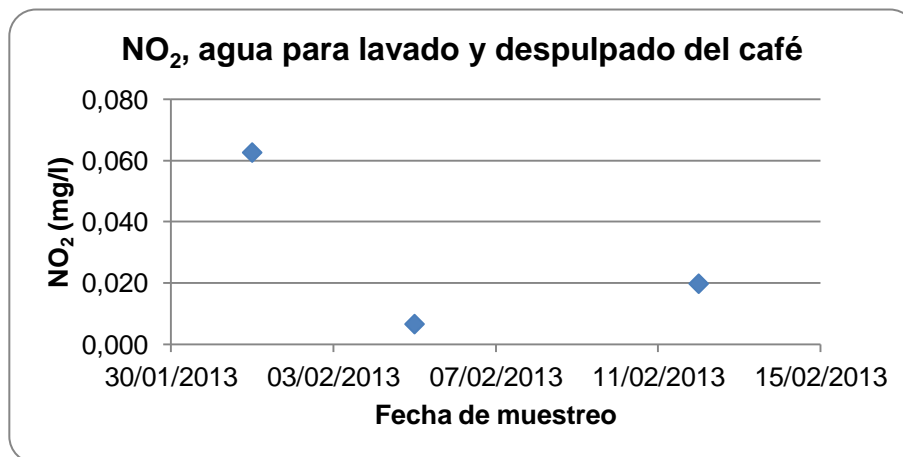
Fuente: elaboración propia.

Figura 25. **Nitratos en el agua para lavado y despulpado del café**



Fuente: elaboración propia.

Figura 26. **Nitritos en el agua para lavado y despulpado del café**



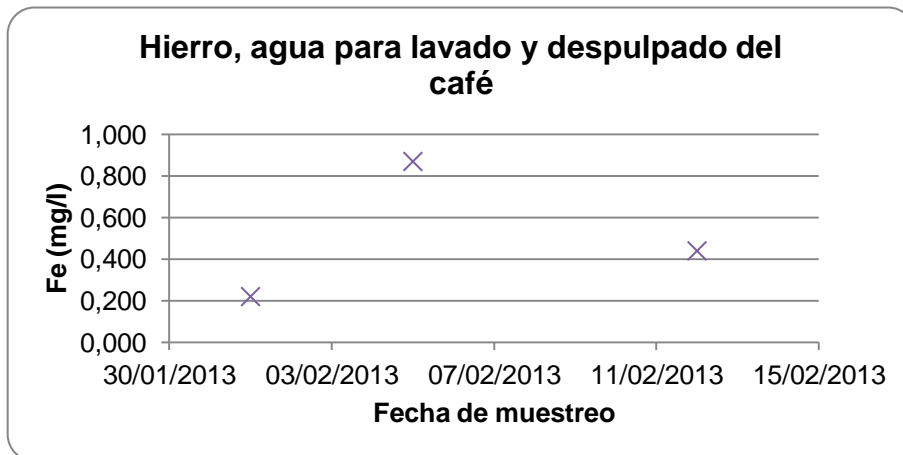
Fuente: elaboración propia.

Figura 27. **Fosfatos en el agua para el lavado y despulpado del café**



Fuente: elaboración propia.

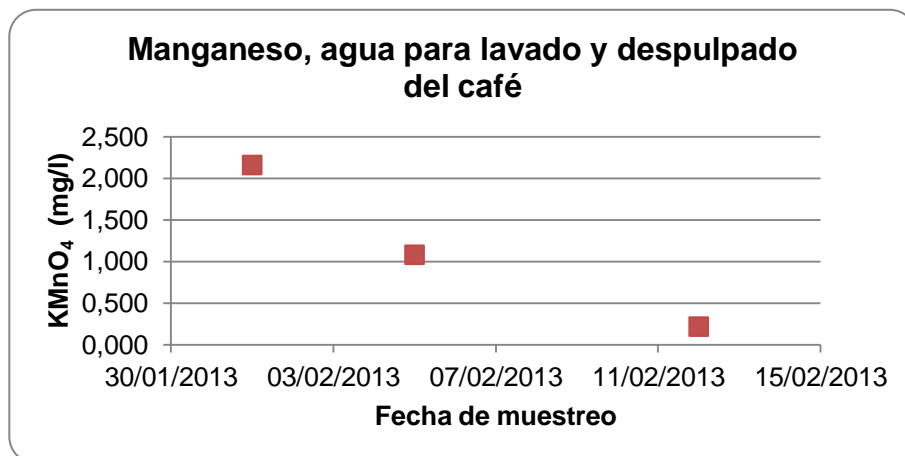
Figura 28. **Hierro en el agua para el lavado y el despulpado del café**



Fuente: elaboración propia.



Figura 29. **Manganeso en el agua para el lavado y despulpado del café**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIII. **Propiedades químicas del agua para lavado y despulpado del café**

Descripción de muestra	Propiedades Químicas (mg/l)				
	Alcalinidad	Cloruros	Dureza	D. Calcio	D. Magnesio
01/02/2013	52	N/R	38	24	14
05/02/2013	108	9	84	46	38
12/02/2013	114	5	78	50	28

Fuente: elaboración propia.

Figura 30. **Alcalinidad del agua para el lavado y el despulpado del café**



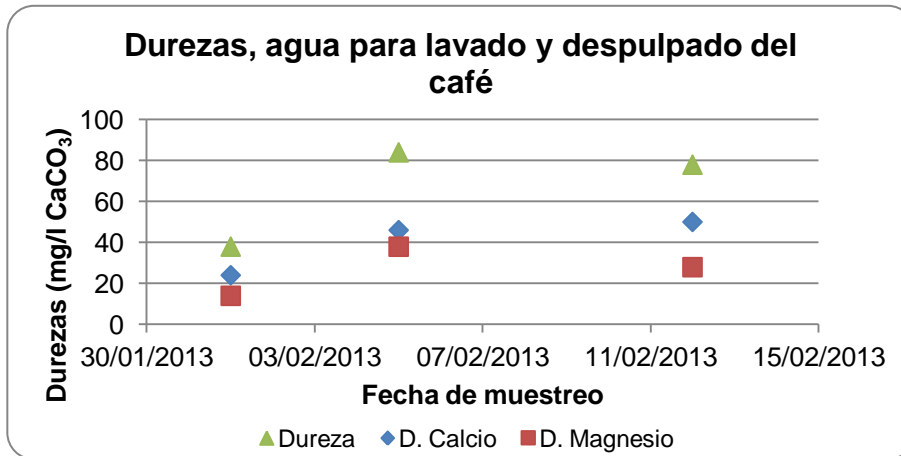
Fuente: elaboración propia.

Figura 31. **Cloruros en el agua para lavado y despulpado del café**



Fuente: elaboración propia.

Figura 32. Dureza en el agua para el lavado y despulpado del café



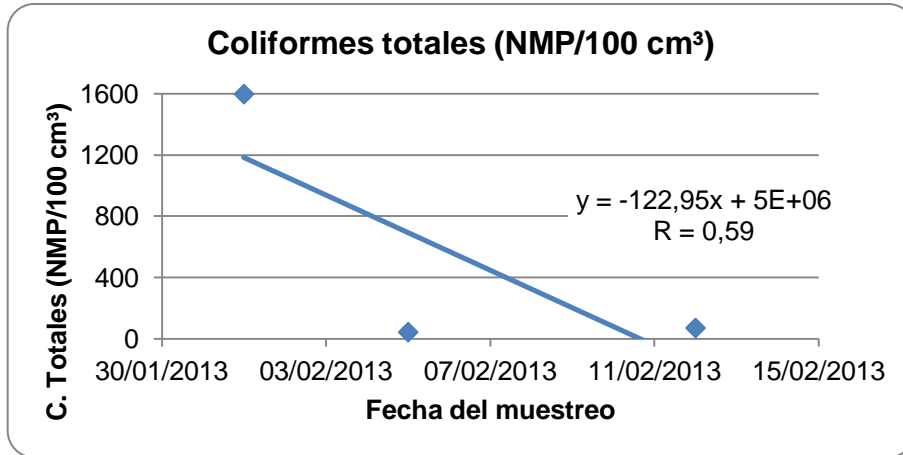
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIV. Análisis bacteriológico del agua para lavado y despulpado del café

Descripción de muestra	Prueba presuntiva	Prueba confirmativa	
		Coliformes totales (NMP/100 cm <sup>3</sup> )	Coliformes fecales (NMP/100 cm <sup>3</sup> )
01/02/2013	1600	1600	240
05/02/2013	76	43	31
12/02/2013	>2400	70	49

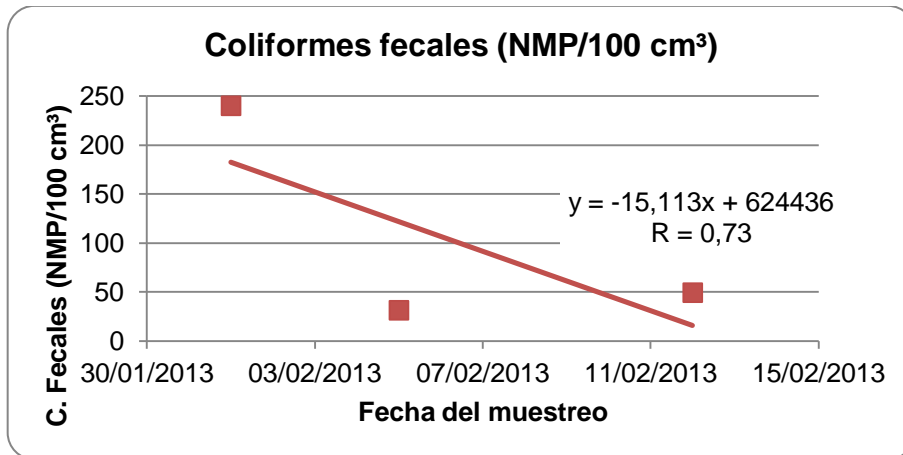
Fuente: elaboración propia.

Figura 33. **Coliformes totales en el agua para lavado y despulpado del café**



Fuente: elaboración propia.

Figura 34. **Coliformes fecales en el agua para lavado y despulpado del café**



Fuente: elaboración propia.

#### 4.1.2. Agua residual generada durante el lavado y despulpado del fruto del café (agua miel cruda)

Los datos presentados en esta sección corresponden a las muestras de agua miel generadas durante el lavado y el despulpado del café.

Tabla XXV. Datos de OD, temperatura y pH del agua miel cruda

Muestreo #	Descripción	O,D, (mg/l)	Temp, (°C)	pH	Observaciones
1	25/10/2012	0,62	25,9	4,11	
2	13/11/2012	0,50	24,1	4,40	
3	15/11/2012	0,28	24,9	4,35	Ver nota <sup>2</sup>
4	20/11/2012	0,30	22,6	4,30	
5	22/11/2012	0,19	28,8	4,32	Ver nota <sup>3</sup>
6	27/11/2012	0,12	25,2	4,30	
7	29/11/2012	0,12	24,4	4,40	
8	04/12/2012	0,27	24,7	4,30	
9	06/12/2012	0,25	25,0	4,30	
10	11/12/2012	0,59	24,2	4,50	

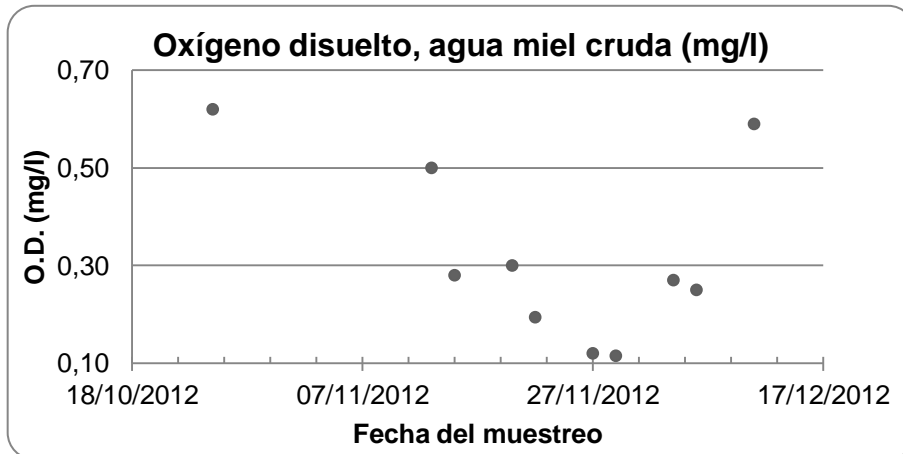
Fuente: elaboración propia.

---

<sup>2</sup> Los valores de OD y pH reportados corresponden a los valores promedio de los datos obtenidos en campo.

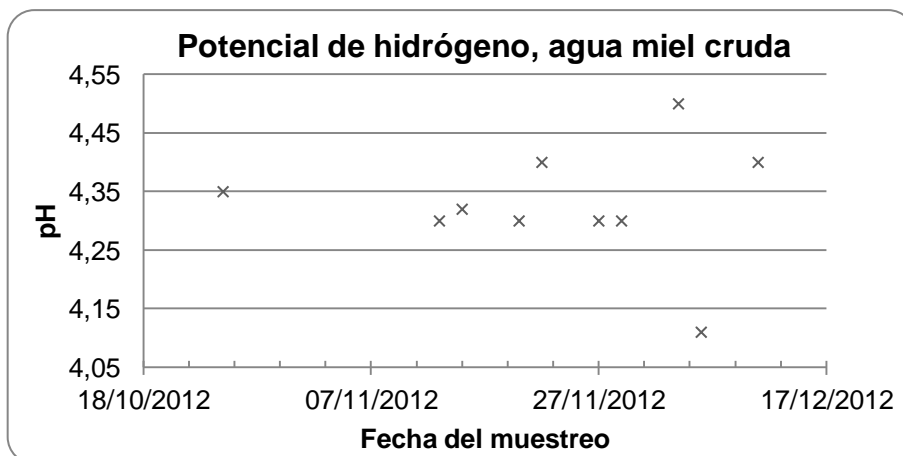
<sup>3</sup> Los valores de OD y pH reportados corresponden a los valores promedio de los datos obtenidos en campo.

Figura 35. **Oxígeno disuelto, agua miel cruda**



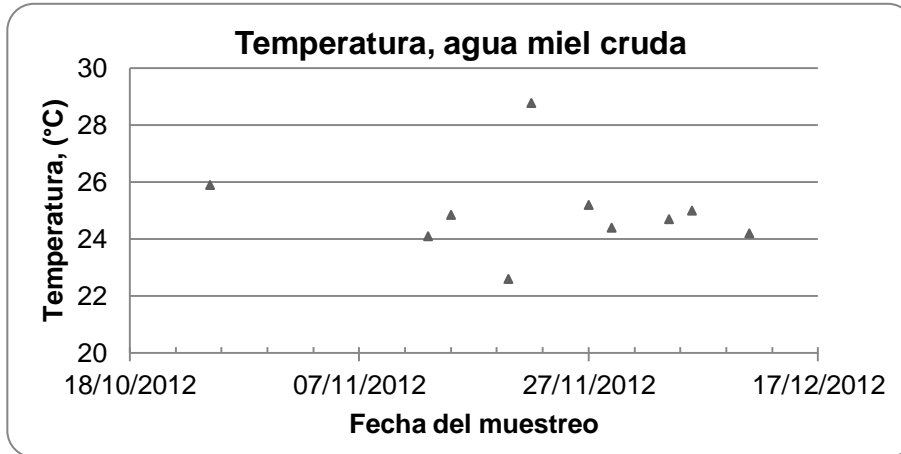
Fuente: elaboración propia.

Figura 36. **Potencial de hidrógeno, agua miel cruda**



Fuente: elaboración propia.

Figura 37. **Temperatura del agua miel cruda**



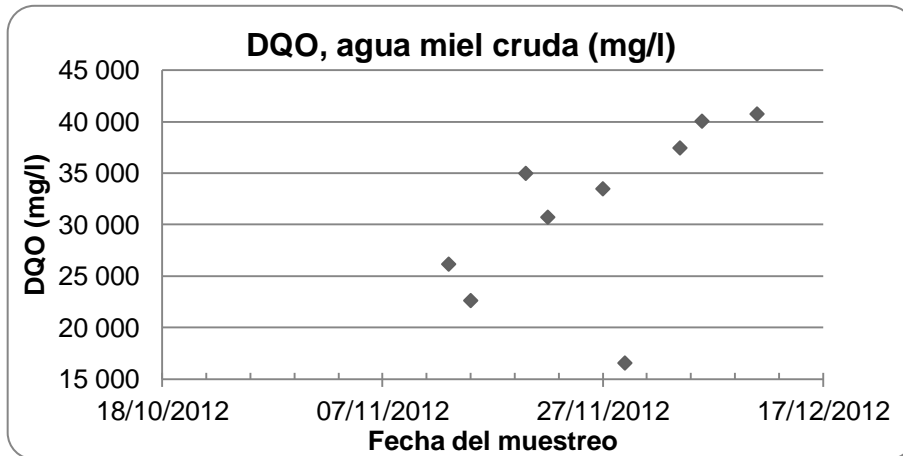
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVI. **Valores de DQO del agua miel cruda**

Descripción de muestra	DQO (mg/l)	Descripción de muestra	DQO (mg/l)
13/11/2012	26 160	29/11/2012	16 550
15/11/2012	22 620	04/12/2012	37 450
20/11/2012	34 980	06/12/2012	40 050
22/11/2012	30 720	11/12/2012	40 750
27/11/2012	33 480		

Fuente: elaboración propia.

Figura 38. **DQO, agua miel cruda**



Fuente: elaboración propia.

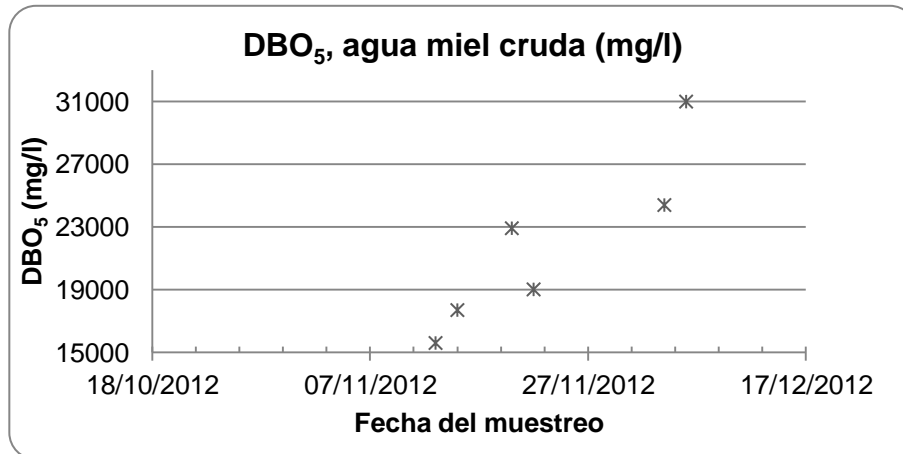
Tabla XXVII. **Valores de DBO<sub>5</sub>**

Descripción de muestra	DBO <sub>5</sub> (mg/l)
13/11/2012	15 600
15/11/2012	17 700
20/11/2012	22 920
22/11/2012	19 020
04/12/2012	24 400
06/12/2012	31 000

Fuente: elaboración propia.



Figura 39. Valores de DBO<sub>5</sub>



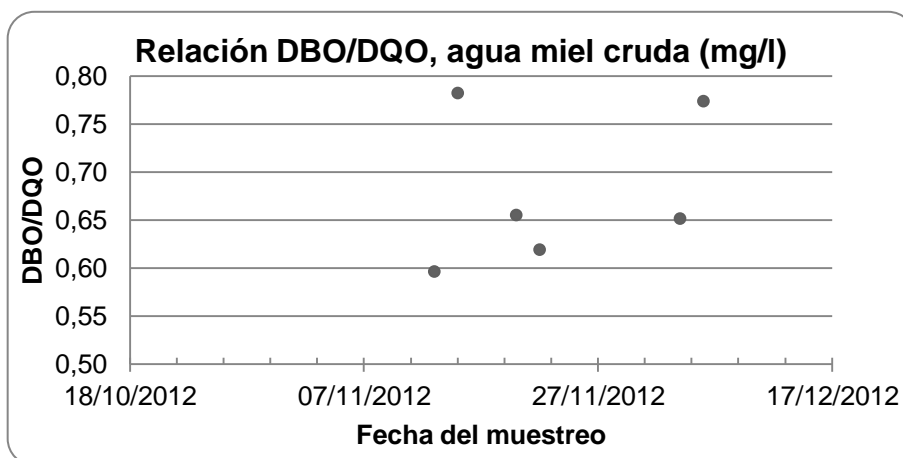
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVIII. Índice de biodegradabilidad DBO<sub>5</sub>/DQO

Descripción de muestra	DQO (mg/l)	DBO <sub>5</sub> (mg/l)	DBO <sub>5</sub> /DQO
13/11/2012	26 160	15 600	0,60
15/11/2012	22 620	17 700	0,78
20/11/2012	34 980	22 920	0,66
22/11/2012	30 720	19 020	0,62
04/12/2012	37 450	24 400	0,65
06/12/2012	40 050	31 000	0,77

Fuente: elaboración propia.

Figura 40. Índice de biodegradabilidad  $DBO_5/DQO$



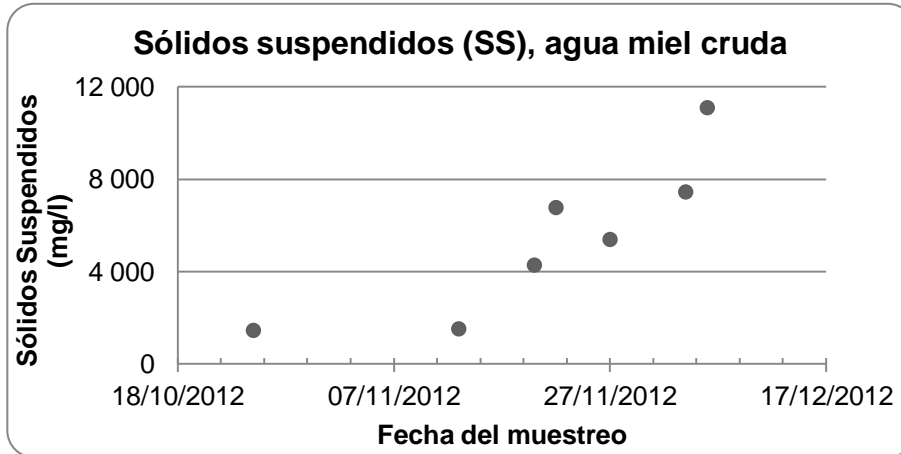
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIX. Datos de sólidos sedimentables y suspendidos

Descripción de muestra	Sólidos	
	Sedimentables (cm <sup>3</sup> /l/h)	Suspendidos (mg/l)
25/10/2012	0	1 450
13/11/2012	59	1 517
20/11/2012	100	4 280
22/11/2012	0	6 773
27/11/2012	100	5 391
04/12/2012	0	7 450
06/12/2012	0	11 100

Fuente: elaboración propia.

Figura 41. **Sólidos suspendidos, agua miel cruda**



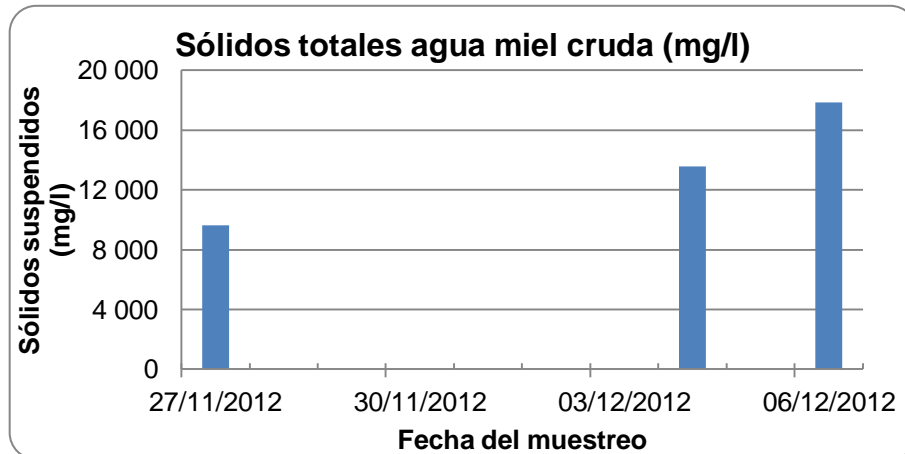
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXX. **Datos de sólidos; ST, SF, SV. Agua miel cruda**

Descripción de muestra	Sólidos		
	Totales (mg/l)	Fijos (mg/l)	Volátiles (mg/l)
27/11/2012	9 645	2 449	7 196
04/12/2012	13 560	2 382	11 178
06/12/2012	17 866		

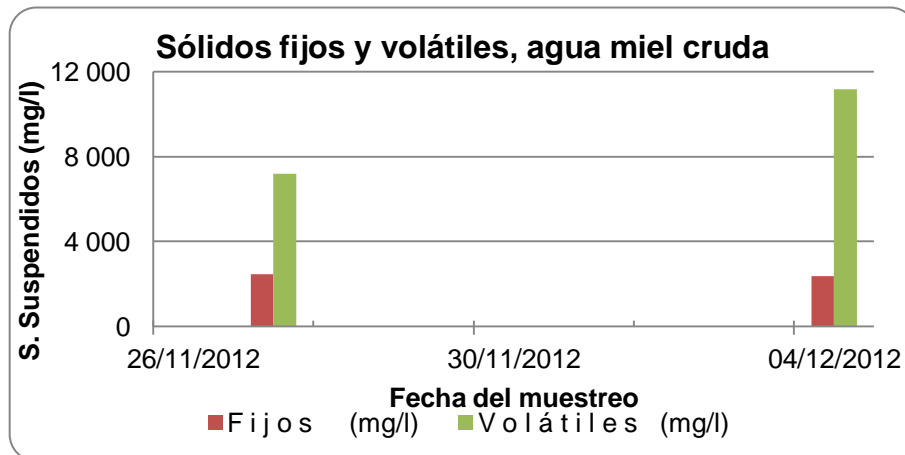
Fuente: elaboración propia.

Figura 42. **Sólidos totales, agua miel cruda**



Fuente: elaboración propia.

Figura 43. **Sólidos fijos y volátiles, agua miel cruda**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXI. **Alcalinidad y acidez del agua miel cruda (mg/l CaCO<sub>3</sub>)**

Descripción de muestra	Alcalinidad (mg/l CaCO <sub>3</sub> )	Acidez (mg/l CaCO <sub>3</sub> )
13/11/2012	80	
15/11/2012	180	
20/11/2012	840	
22/11/2012	240	
27/11/2012	600	1 680
29/11/2012	1 000	1 300
04/12/2012	750	2 000
06/12/2012	750	9 500
11/12/2012	500	

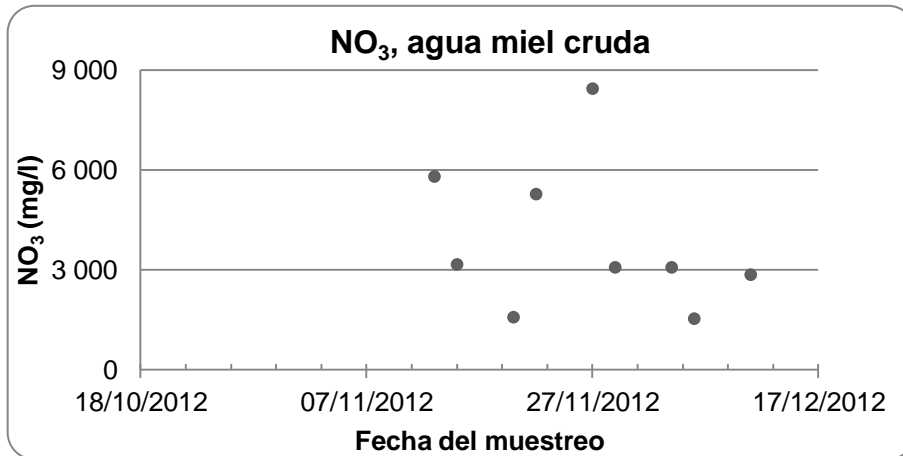
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXII. **Nutrientes en el agua miel cruda**

Descripción de muestra	Nutrientes			
	NO <sub>3</sub> (mg/l)	NO <sub>2</sub> (mg/l)	NH <sub>3</sub> (mg/l)	PO <sub>4</sub> (mg/l)
13/11/2012	5 808	44	176	492
15/11/2012	3 168	51	234	204
20/11/2012	1 584	79	220	120
22/11/2012	5 280	32	366	288
27/11/2012	8 448	16	59	276
29/11/2012	3 080	7	67	130
04/12/2012	3 080	7	98	170
06/12/2012	1 540	15	220	135

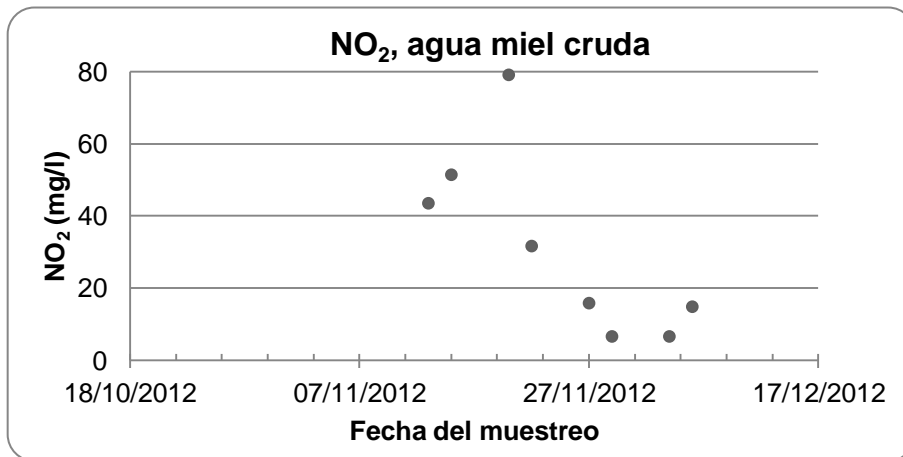
Fuente: elaboración propia.

Figura 44. **NO<sub>3</sub>, agua miel cruda**



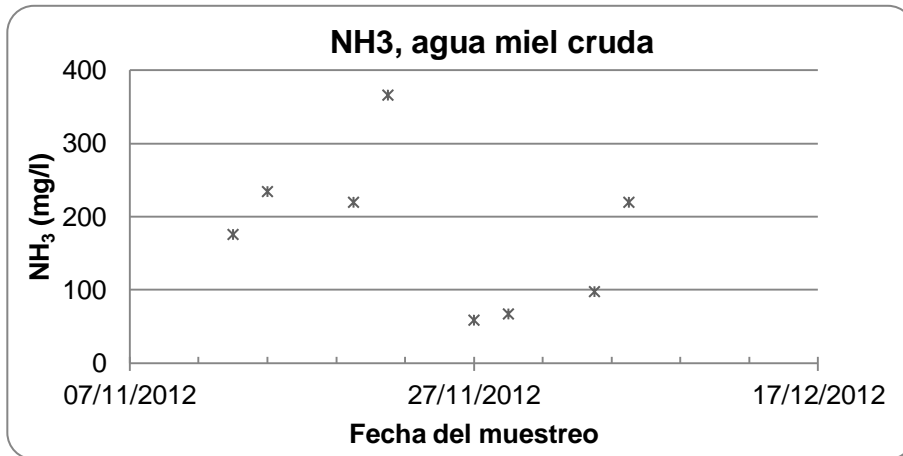
Fuente: elaboración propia.

Figura 45. **NO<sub>2</sub>, agua miel cruda**



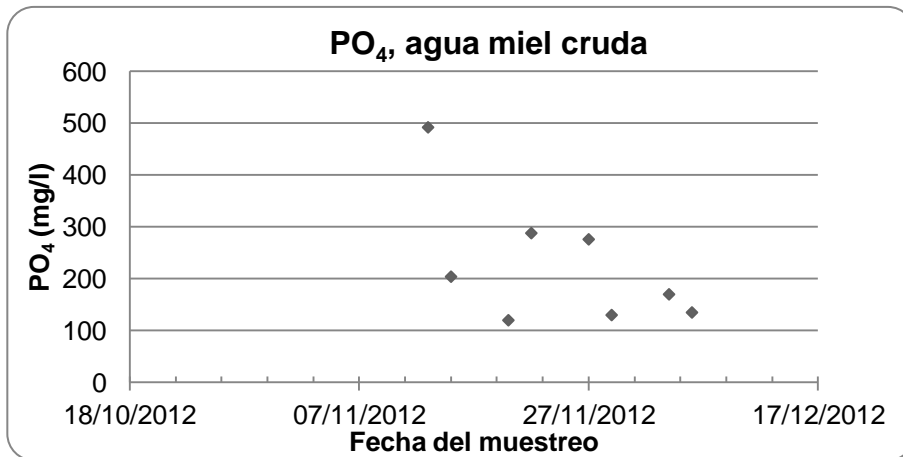
Fuente: elaboración propia.

Figura 46. **NH<sub>3</sub>, agua miel cruda**



Fuente: elaboración propia.

Figura 47. **PO<sub>4</sub>, agua miel cruda**



Fuente: elaboración propia.

#### 4.1.3. Agua miel tratada con hidróxido de calcio

Los datos presentados en esta sección corresponden a las muestras de agua miel tratada con hidróxido de calcio.

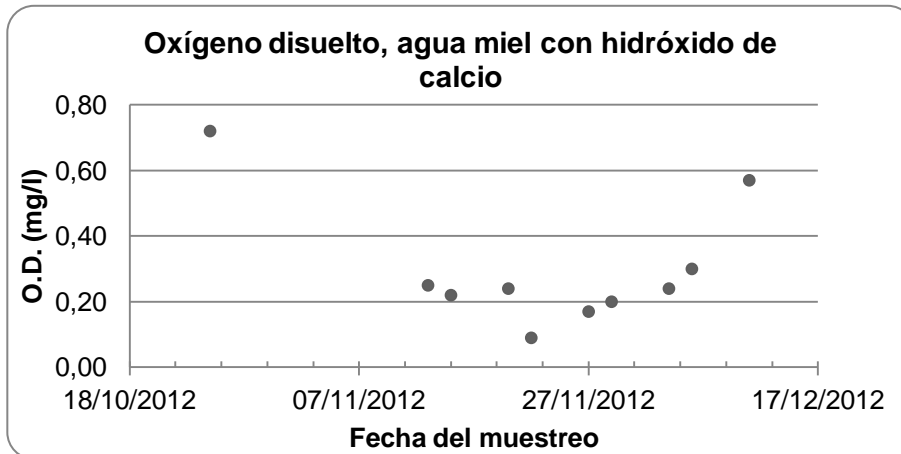
Tabla XXXIII. Datos de OD y pH, agua miel con hidróxido de calcio

Muestreo #	Fecha	O,D, (mg/l)	Temp, (°C)	pH
1	25/10/2012	0,72	25,8	5,36
2	13/11/2012	0,25	23,8	5,50
3	15/11/2012	0,22	23,8	5,70
4	20/11/2012	0,24	23,4	5,70
5	22/11/2012	0,09	25,0	5,80
6	27/11/2012	0,17	24,0	5,50
7	29/11/2012	0,20	21,8	5,70
8	04/12/2012	0,24	20,4	5,49
9	06/12/2012	0,30	22,3	5,30
10	11/12/2012	0,57	22,9	5,70

Fuente: elaboración propia.

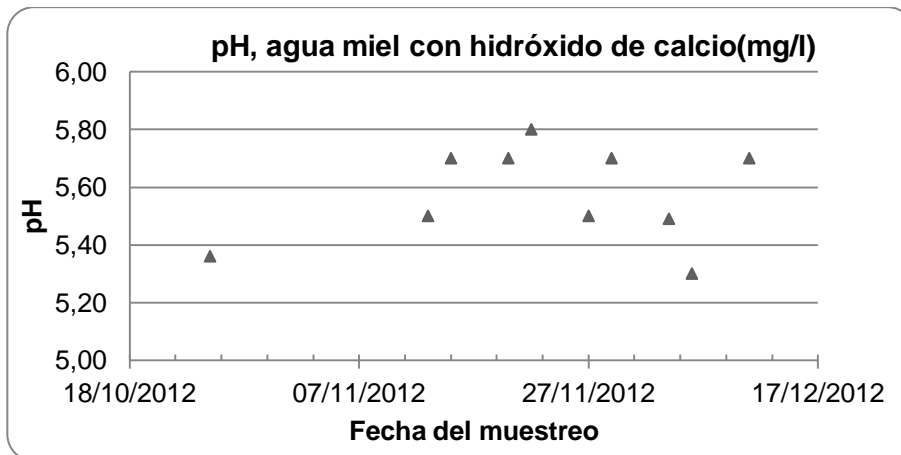


Figura 48. **Oxígeno disuelto, agua miel con hidróxido de calcio**



Fuente: elaboración propia.

Figura 49. **pH agua miel con hidróxido de calcio**



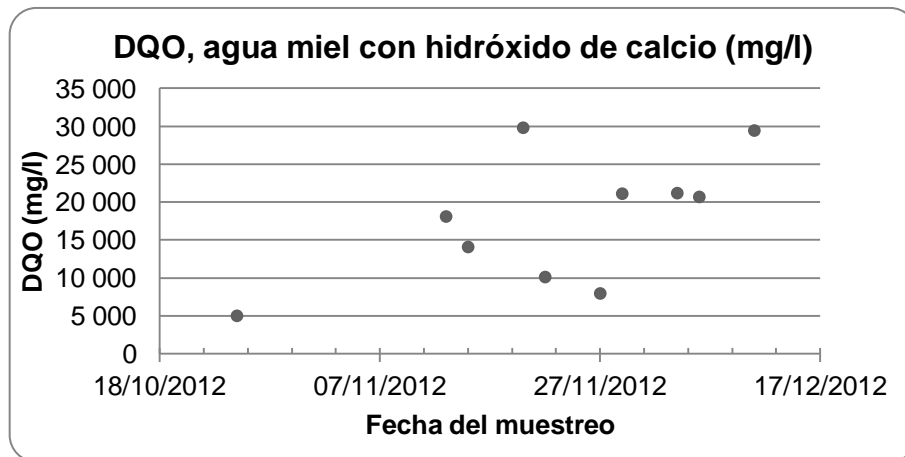
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIV. **DQO, agua miel con hidróxido de calcio**

Descripción de muestra	DQO (mg/l)	Descripción de muestra	DQO (mg/l)
25/10/2012	5 030	27/11/2012	7 980
13/11/2012	18 120	29/11/2012	21 125
15/11/2012	14 100	04/12/2012	21 200
20/11/2012	29 820	06/12/2012	20 700
22/11/2012	10 140	11/12/2012	29 450

Fuente: elaboración propia.

Figura 50. **DQO agua miel con hidróxido de calcio**



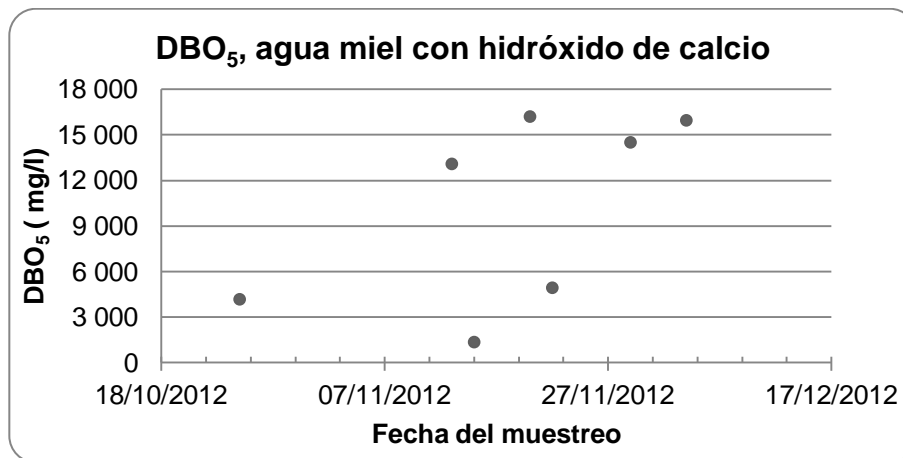
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXV. **DBO<sub>5</sub> agua miel con hidróxido de calcio**

Descripción de muestra	DBO <sub>5</sub> (mg/l)	Descripción de muestra	DBO <sub>5</sub> (mg/l)
25/10/2012	4 160	22/11/2012	4 920
13/11/2012	13 080	04/12/2012	14 500
15/11/2012	1 340	06/12/2012	15 950
20/11/2012	16 200		

Fuente: elaboración propia.

Figura 51. **DBO<sub>5</sub>, agua miel con hidróxido de calcio**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVI. **Coefficiente de biodegradabilidad, agua miel con hidróxido de calcio**

Descripción de muestra	DQO (mg/l)	DBO <sub>5</sub> (mg/l)	DBO <sub>5</sub> /DQO
25/10/2012	5 030	4 160	0,83
13/11/2012	18 120	13 080	0,72
15/11/2012	14 100	1 340	0,10
20/11/2012	29 820	16 200	0,54
22/11/2012	10 140	4 920	0,49
04/12/2012	21 200	14 500	0,68
06/12/2012	20 700	15 950	0,77

Fuente: elaboración propia.

Figura 52. **Relación DBO<sub>5</sub>/DQO agua miel con hidróxido de calcio**



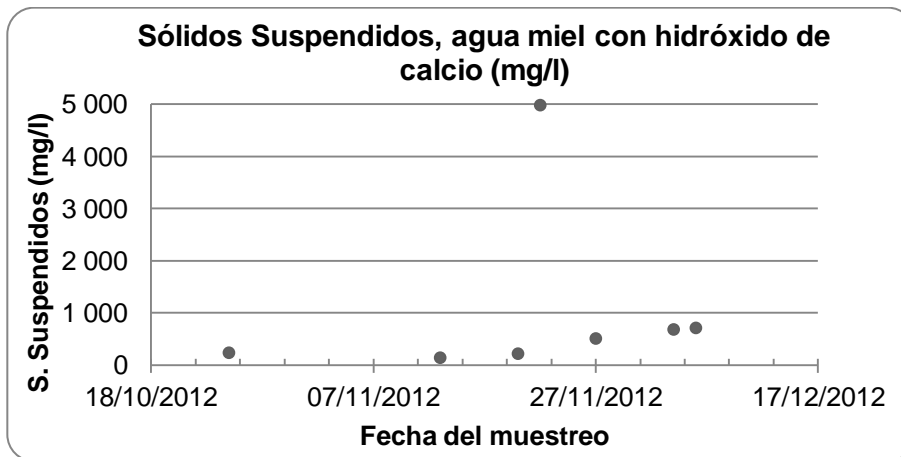
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVII. **Sólidos, agua miel con hidróxido de calcio**

Descripción de muestra	Sólidos	
	Sedimentables (cm <sup>3</sup> /l/h)	Suspendidos (mg/l)
25/10/2012	0	234
13/11/2012	0	139
20/11/2012	2	216
22/11/2012	230	4 980
27/11/2012	40	507
04/12/2012	14	680
06/12/2012	12	710

Fuente: elaboración propia.

Figura 53. **Sólidos suspendidos, agua miel con hidróxido de calcio**



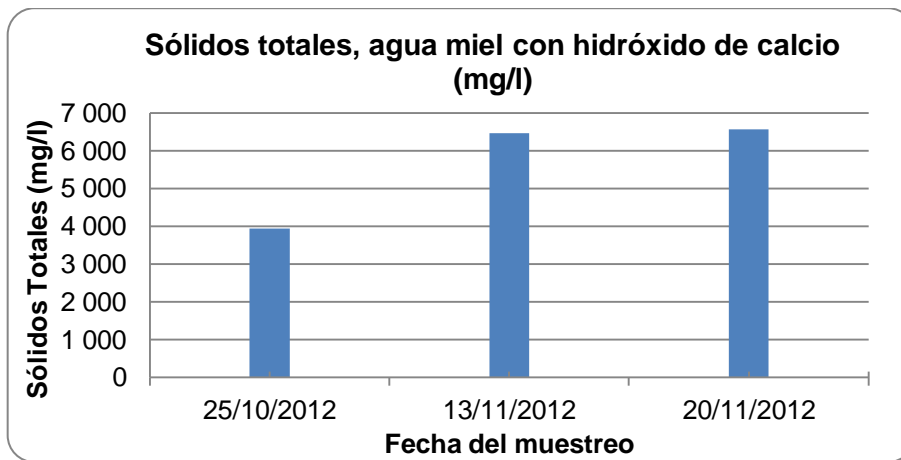
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVIII. **Sólidos totales agua miel con hidróxido de calcio**

Descripción de muestra	Sólidos
	Totales (mg/l)
27/11/2012	3 943
04/12/2012	6 467
06/12/2012	6 564

Fuente: elaboración propia.

Figura 54. **Sólidos totales, agua miel con hidróxido de calcio**



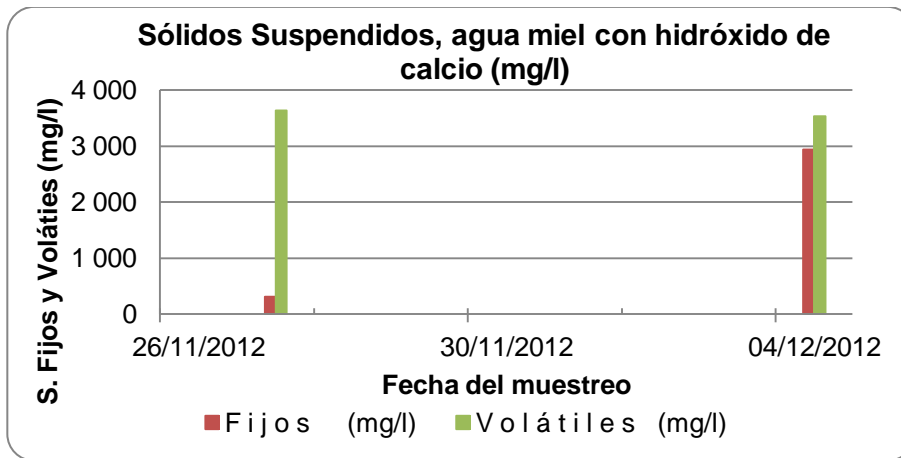
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIX. **Sólidos fijos y volátiles, agua miel con hidróxido de calcio**

Descripción de muestra	Sólidos	
	Fijos (mg/l)	Volátiles (mg/l)
27/11/2012	313	3 630
04/12/2012	2 938	3 529

Fuente: elaboración propia.

Figura 55. **Sólidos fijos y volátiles, agua miel con hidróxido de calcio**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XL. **Alcalinidad, agua miel con hidróxido de calcio**

Descripción de muestra	Alcalinidad (mg/l CaCO <sub>3</sub> )
13/11/2012	1 600
15/11/2012	2 220
20/11/2012	1 920
22/11/2012	1 440
27/11/2012	1 056
29/11/2012	1 580
04/12/2012	1 380
06/12/2012	6 000
11/12/2012	5 000

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLI. **Acidez, agua miel con hidróxido de calcio**

Descripción de muestra	Acidez (mg/l CaCO <sub>3</sub> )
27/11/2012	408
29/11/2012	680
04/12/2012	800
06/12/2012	3 650

Fuente: elaboración propia.



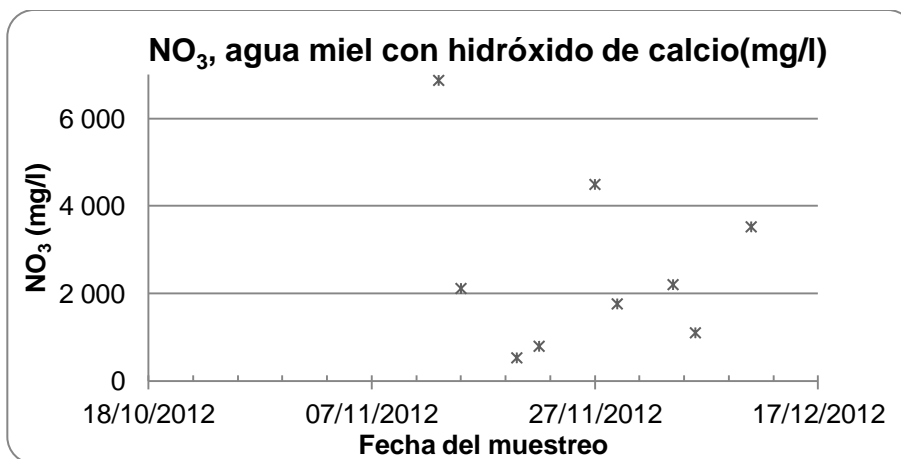
Tabla XLII. **NO<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub> y PO<sub>4</sub>, agua miel con hidróxido de calcio**

Muestra	NO <sub>3</sub> (mg/l)	NO <sub>2</sub> (mg/l)	NH <sub>3</sub> (mg/l)	PO <sub>4</sub> (mg/l)
13/11/2012	6 864	36	293	210
15/11/2012	2 112	24	161	300
20/11/2012	528	10	15	240
22/11/2012	792	28	256	30
27/11/2012	4 488	2	7	186
29/11/2012	1 760	28	165	895
04/12/2012	2 200	7	67	95
06/12/2012	1 100	5	134	115
11/12/2012	3 520	N/R	N/R	N/R

N/R = Análisis no realizado

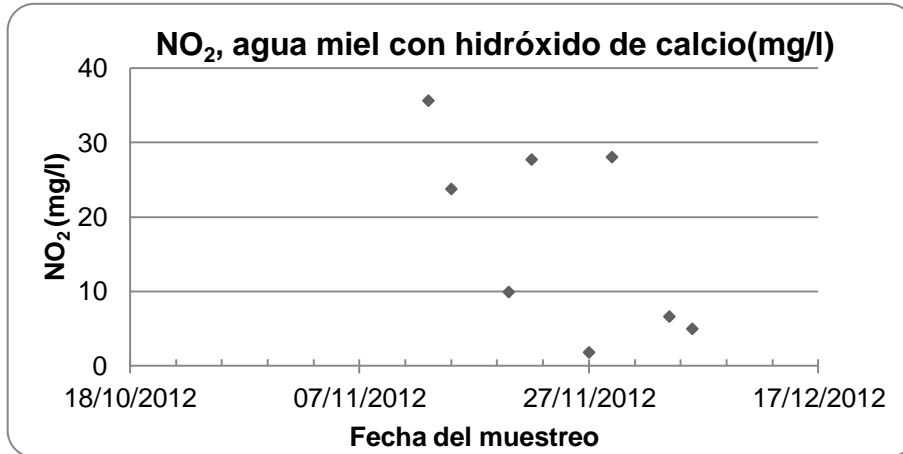
Fuente: elaboración propia.

Figura 56. **NO<sub>3</sub>, agua miel con hidróxido de calcio**



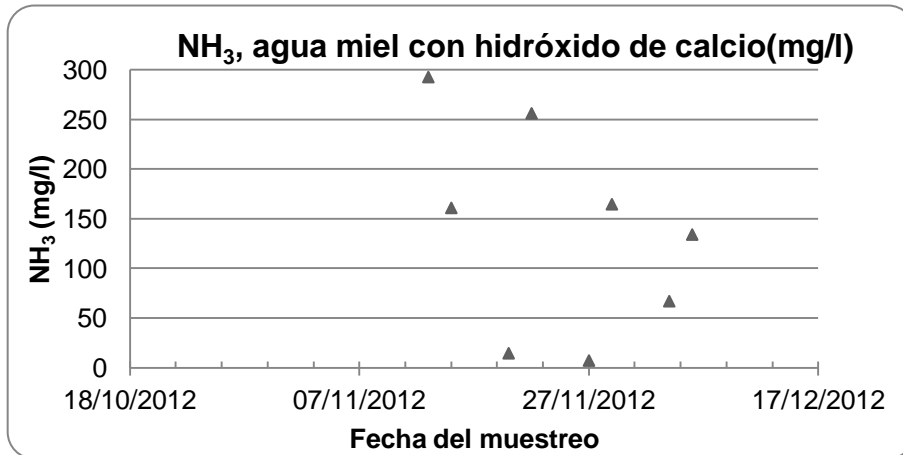
Fuente: elaboración propia.

Figura 57. **NO<sub>2</sub>, agua miel con hidróxido de calcio**



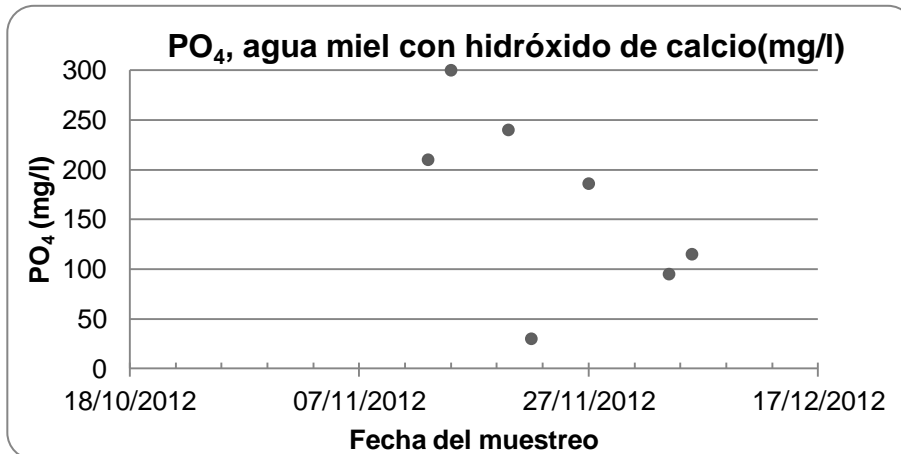
Fuente: elaboración propia.

Figura 58. **NH<sub>3</sub>, agua miel con hidróxido de calcio**



Fuente: elaboración propia.

Figura 59. **PO<sub>4</sub>, agua miel con hidróxido de calcio**



Fuente: elaboración propia.

#### 4.2. Valoraciones sobre la eficiencia del tratamiento actual

Las valoraciones sobre la eficiencia del tratamiento actual se realizan mediante una comparación de los parámetros de control seleccionados del agua miel generada durante el proceso de lavado y despulpado del café vrs. El agua miel con hidróxido de calcio efluente del tratamiento actual.

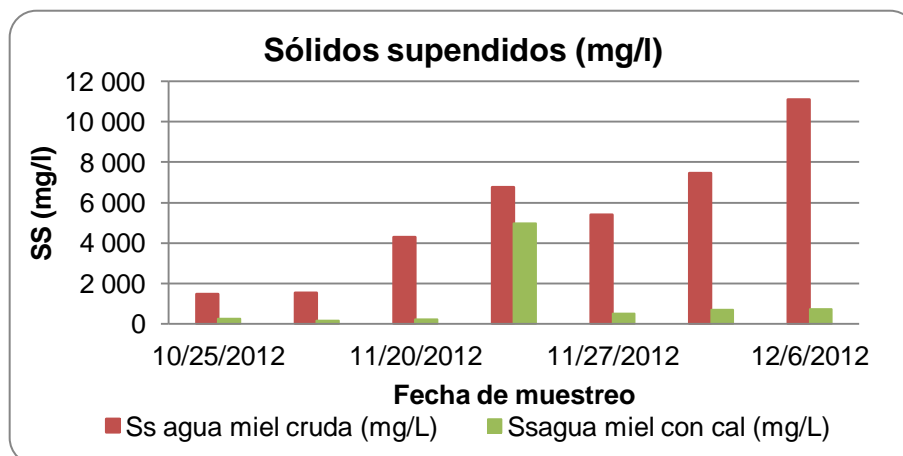
El resumen de los resultados obtenidos es:

Tabla XLIII. **Sólidos suspendidos remanentes, agua miel con hidróxido de calcio**

Fecha	SS agua miel cruda (mg/l)	SS agua miel con cal (mg/l)	Eficiencia de remoción (%)
25/10/2012	1 450	234	83,86
13/11/2012	1 517	139	90,86
20/11/2012	4 280	216	94,95
22/11/2012	6 773	4 980	26,47
27/11/2012	5 391	507	90,60
04/12/2012	7 450	680	90,87
06/12/2012	11 100	710	93,60

Fuente: elaboración propia.

Figura 60. **Sólidos suspendidos, agua miel cruda y agua miel con hidróxido de calcio**



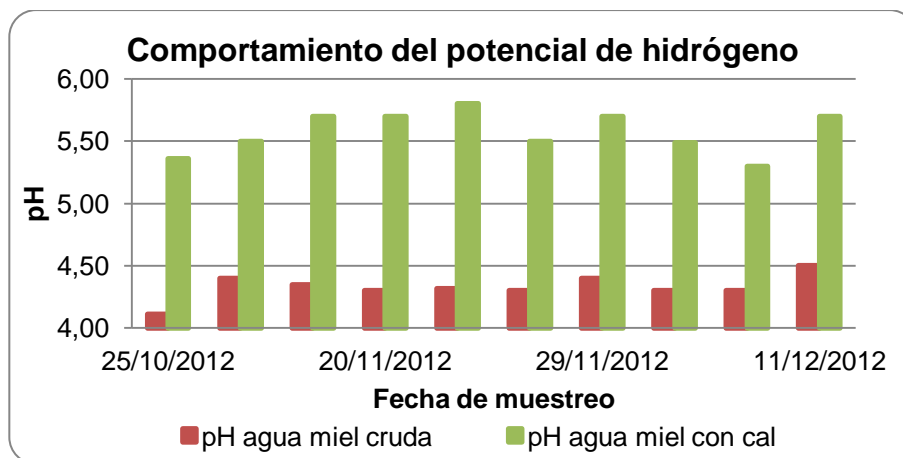
Fuente: elaboración propia.

Tabla XLIV. **pH, agua miel cruda y agua miel con hidróxido de calcio**

Fecha	pH agua miel cruda	pH agua miel con cal	$\Delta$ potencial de hidrógeno
25/10/2012	4,11	5,36	1,25
13/11/2012	4,40	5,50	1,10
15/11/2012	4,35	5,70	1,35
20/11/2012	4,30	5,70	1,40
22/11/2012	4,32	5,80	1,48
27/11/2012	4,30	5,50	1,20
29/11/2012	4,40	5,70	1,30
04/12/2012	4,30	5,49	1,19
06/12/2012	4,30	5,30	1,00
11/12/2012	4,50	5,70	1,20

Fuente: elaboración propia.

Figura 61. **Comportamiento del potencial de hidrógeno, agua miel cruda y agua miel con hidróxido de calcio**



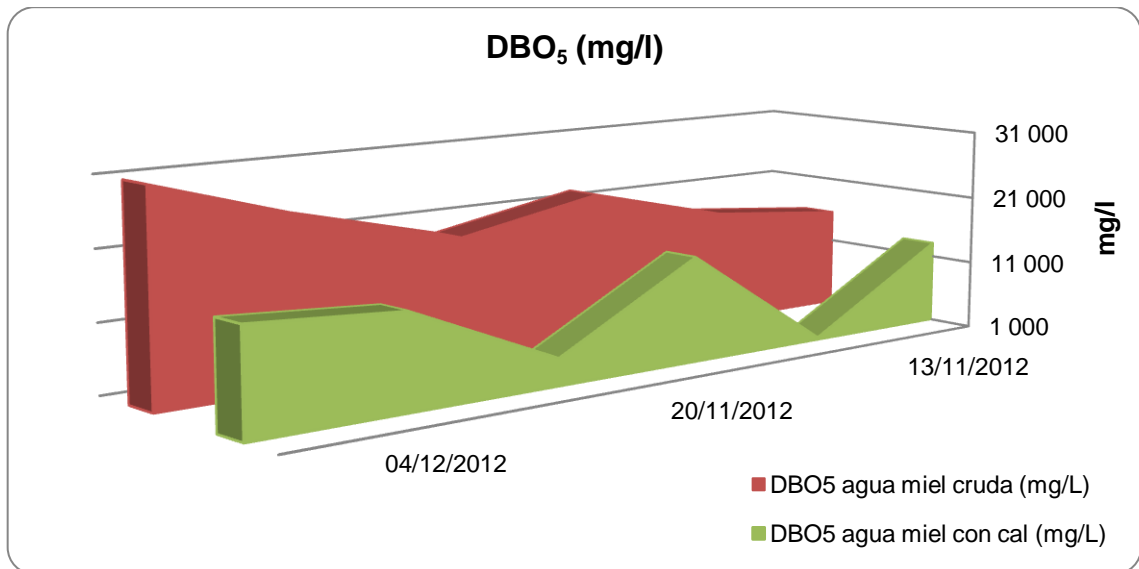
Fuente: elaboración propia.

Tabla XLV. **DBO<sub>5</sub> remanente entre el agua miel cruda y agua miel con hidróxido de calcio**

Fecha	DBO <sub>5</sub> agua miel cruda (mg/l)	DBO <sub>5</sub> agua miel con cal (mg/l)	Eficiencia de remoción (%)
13/11/2012	15 600	13 080	16,15
15/11/2012	17 700	1 340	92,43
20/11/2012	22 920	16 200	29,32
22/11/2012	19 020	4 920	74,13
04/12/2012	24 400	14 500	40,57
06/12/2012	31 000	15 950	48,55

Fuente: elaboración propia.

Figura 62. **DBO<sub>5</sub> del agua miel cruda y el agua miel con hidróxido de calcio**



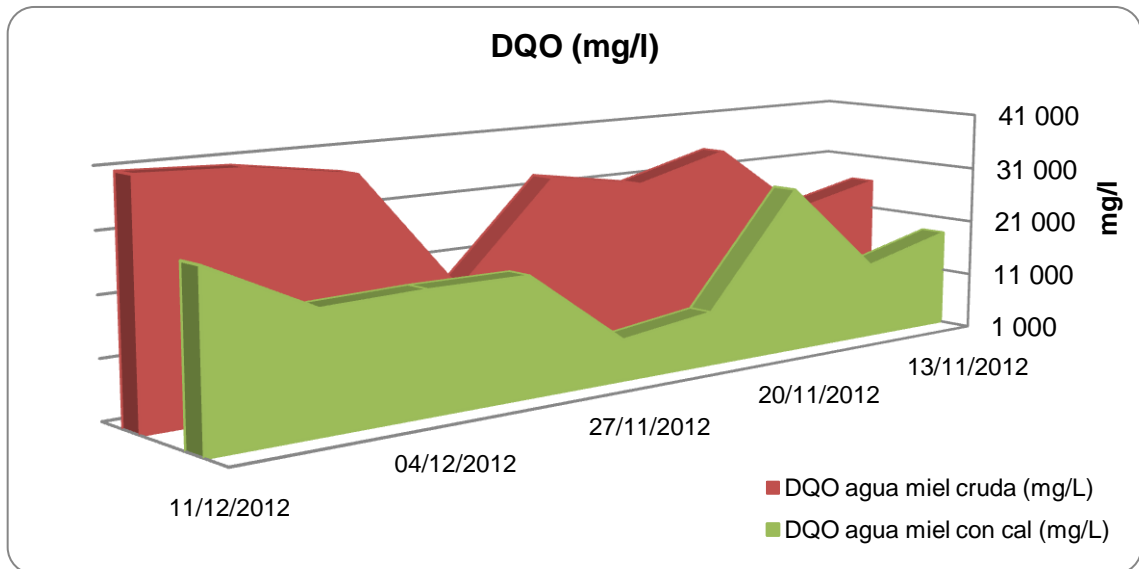
Fuente: elaboración propia.

Tabla XLVI. **DQO remanente entre el agua miel cruda y el agua miel con hidróxido de calcio**

Fecha	DQO agua miel cruda (mg/l)	DQO agua miel con cal (mg/l)	Eficiencia de remoción (%)
25/10/2012	90 000	5 030	94,41
13/11/2012	26 160	18 120	30,73
15/11/2012	22 620	14 100	37,67
20/11/2012	34 980	29 820	14,75
22/11/2012	30 720	10 140	66,99
27/11/2012	33 480	7 980	76,16
29/11/2012	16 550	21 125	-27,64
04/12/2012	37 450	21 200	43,39
06/12/2012	40 050	20 700	48,31
11/12/2012	40 750	29 450	27,73

Fuente: elaboración propia.

Figura 63. **DQO del agua miel cruda y el agua miel con hidróxido de calcio**



Fuente: elaboración propia.

### 4.3. **Análisis estadístico de los datos de producción**

El análisis estadístico de los datos de producción es el siguiente:

#### 4.3.1. **Datos de producción de la cosecha 2012-2013**

Los datos correspondientes a la producción de la cosecha 2012-2013 para el beneficio analizado son los siguientes:



Tabla XLVII. **Datos de producción durante el 2012**

Fecha	Cantidad	Fecha	Cantidad	Fecha	Cantidad
Octubre		Noviembre		Diciembre	
09/10/2012	2,79	03/11/2012	30,85	01/12/2012	201,41
11/10/2012	23,04	05/11/2012	150,72	03/12/2012	400,06
12/10/2012	36,81	06/11/2012	197,04	04/12/2012	607,78
13/10/2012	7,18	07/11/2012	185,45	05/12/2012	572,59
16/10/2012	17,45	08/11/2012	143,55	06/12/2012	556,12
17/10/2012	21,34	09/11/2012	122,16	07/12/2012	435,14
18/10/2012	21,85	10/11/2012	75,59	10/12/2012	464,91
19/10/2012	25,94	12/11/2012	233,48	11/12/2012	539,51
20/10/2012	41,19	13/11/2012	287,87	12/12/2012	637,81
22/10/2012	36,56	14/11/2012	256,02	13/12/2012	577,62
23/10/2012	110,33	15/11/2012	200,93	14/12/2012	477,82
24/10/2012	96,73	16/11/2012	165,91	15/12/2012	402,03
25/10/2012	70,43	17/11/2012	149,23	17/12/2012	724,28
27/10/2012	36,86	19/11/2012	264,60	18/12/2012	998,19
29/10/2012	27,00	20/11/2012	324,16	19/12/2012	682,09
30/10/2012	90,01	21/11/2012	408,24	20/12/2012	641,18
31/10/2012	51,83	22/11/2012	313,74	21/12/2012	661,73
		23/11/2012	269,43	22/12/2012	363,69
		24/11/2012	143,05	26/12/2012	380,51
		26/11/2012	347,54	27/12/2012	610,52
		27/11/2012	365,56	28/12/2012	481,25
		28/11/2012	303,48	29/12/2012	511,83
		29/11/2012	297,53		
		30/11/2012	274,30		
Sub-Total	717,34		5 510,43		11 928,07

Fuente: Beneficio Nuevo Sendero.

Tabla XLVIII. **Datos de producción durante el 2013**

Fecha	Cantidad	Fecha	Cantidad	Fecha	Cantidad
Enero		Febrero		Marzo	
02/01/2013	728,26	01/02/2013	207,04	01/03/2013	153,43
03/01/2013	864,13	02/02/2013	260,54	02/03/2013	39,98
04/01/2013	910,53	04/02/2013	195,01	04/03/2013	74,62
05/01/2013	673,11	05/02/2013	462,60	05/03/2013	115,87
06/01/2013	184,97	06/02/2013	277,06	06/03/2013	39,54
07/01/2013	655,06	07/02/2013	562,39	07/03/2013	49,13
08/01/2013	998,26	08/02/2013	463,13	08/03/2013	17,35
09/01/2013	767,03	09/02/2013	392,49	09/03/2013	7,40
10/01/2013	952,88	11/02/2013	315,65	11/03/2013	11,55
11/01/2013	783,43	12/02/2013	428,42	12/03/2013	19,91
12/01/2013	605,59	13/02/2013	357,14	13/03/2013	15,31
14/01/2013	628,56	14/02/2013	412,20	14/03/2013	2,77
15/01/2013	594,24	15/02/2013	175,68	15/03/2013	9,12
16/01/2013	624,94	16/02/2013	187,63	18/03/2013	14,56
17/01/2013	755,73	18/02/2013	404,05	19/03/2013	26,46
18/01/2013	635,75	19/02/2013	362,39	20/03/2013	37,07
19/01/2013	607,55	20/02/2013	129,14	21/03/2013	17,05
22/01/2013	478,49	21/02/2013	124,90	22/03/2013	52,20
23/01/2013	492,81	22/02/2013	88,08	23/03/2013	14,17
24/01/2013	362,53	23/02/2013	74,01	25/03/2013	9,40
25/01/2013	294,49	25/02/2013	120,53		
26/01/2013	288,54	26/02/2013	75,70		
28/01/2013	256,02	27/02/2013	54,09		
29/01/2013	473,67	28/02/2013	158,01		
30/01/2013	327,91				
31/01/2013	336,78				
Sub - Total	15 281,26		6 287,88		726,89

Fuente: Beneficio Nuevo Sendero.

Tabla XLIX. **Resumen de datos de producción cosecha 2012-2013**

Descripción	Cantidad	Unidad
Volumen de fruto de café procesado	40 449,08	quintales
Equivalencia entre fruto y pergamino seco	4,75	
Volumen de café pergamino seco procesado	8 515,60	quintales

Fuente: elaboración propia.

Algunos datos relevantes en relación al análisis de la producción de la cosecha 2012 – 2013 son los siguientes:

Tabla L. **Datos relevantes de la producción de la cosecha 2012 – 2013**

Descripción	Cantidad	Unidad
Producción máxima	998,26	quintales
Fecha de la producción máxima	08/01/2013	
Producción menor	2,77	quintales
Fecha de la producción máxima	14/03/2013	
Días de producción	132	días
Media	306,43	quintales
Mediana	264,60	quintales
Desviación estándar	256,46	quintales

Fuente: elaboración propia.

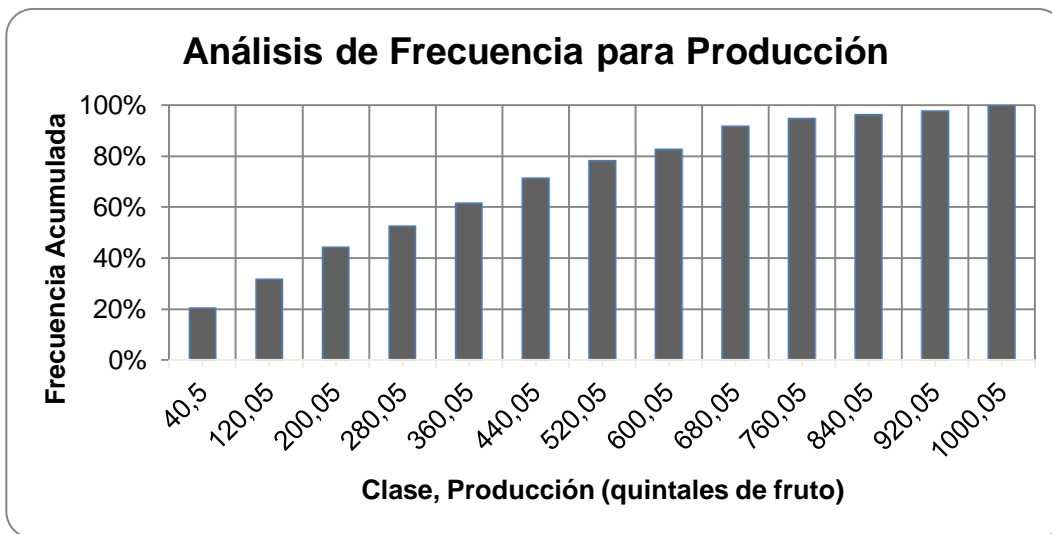
El análisis de frecuencia para los datos de producción es el siguiente:

Tabla LI. **Análisis de frecuencia para la producción cosecha 2012-2013**

N° de Clase	Intervalos de Clase		Marca de Clase	Frecuencia Absoluta		Frecuencia Relativa	
				Obtenida	Acumulada	Obtenida	Acumulada
1	0	80	40,5	27	27	20,30%	20,30%
2	80,1	160	120,05	15	42	11,28%	31,58%
3	160,1	240	200,05	17	59	12,78%	44,36%
4	240,1	320	280,05	11	70	8,27%	52,63%
5	320,1	400	360,05	12	82	9,02%	61,65%
6	400,1	480	440,05	13	95	9,77%	71,43%
7	480,1	560	520,05	9	104	6,77%	78,20%
8	560,1	640	600,05	6	110	4,51%	82,71%
9	640,1	720	680,05	12	122	9,02%	91,73%
10	720,1	800	760,05	4	126	3,01%	94,74%
11	800,1	880	840,05	2	128	1,50%	96,24%
12	880,1	960	920,05	2	130	1,50%	97,74%
13	960,1	1040	1 000,05	3	133	2,26%	100,00%

Fuente: elaboración propia.

Figura 64. **Análisis de frecuencia para la producción de la cosecha 2012-2013**



Fuente: elaboración propia.

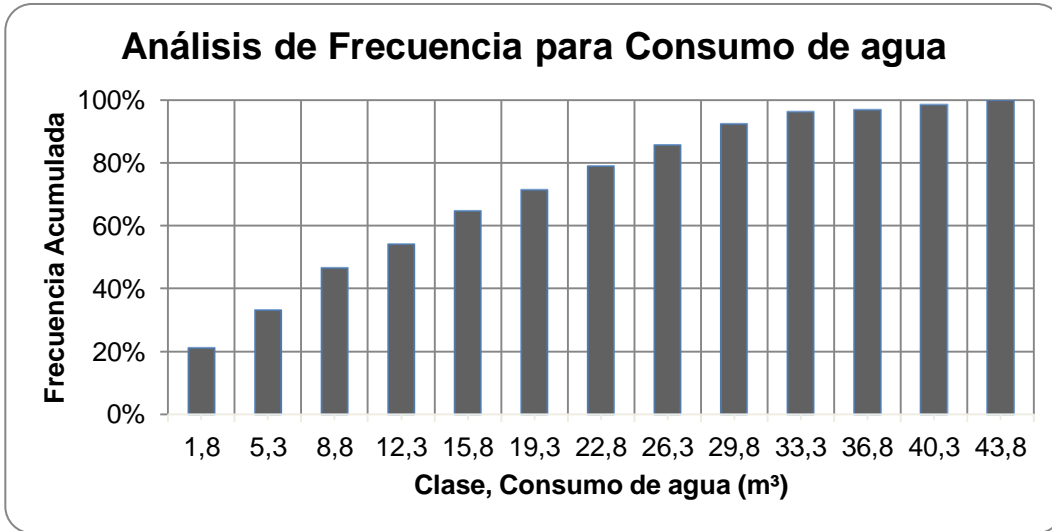
El análisis de frecuencia para el consumo de agua durante la cosecha 2012 – 2013 es el siguiente:

Tabla LII. **Análisis de frecuencia para el consumo de agua de la cosecha  
2012 – 2013**

N° de Clase	Intervalos de Clase		Marca de Clase	Frecuencia Absoluta		Frecuencia Relativa	
				Obtenida	Acumulada	Obtenida	Acumulada
1	0	3,5	1,8	28	29	21,05%	21,05%
2	3,51	7,0	5,3	16	45	12,03%	33,08%
3	7,01	10,5	8,8	18	63	13,53%	46,62%
4	10,51	14,0	12,3	10	73	7,52%	54,14%
5	14,01	17,5	15,8	14	87	10,53%	64,66%
6	17,51	21,0	19,3	9	96	6,77%	71,43%
7	21,01	24,5	22,8	10	106	7,52%	78,95%
8	24,51	28,0	26,3	9	115	6,77%	85,71%
9	28,01	31,5	29,8	9	124	6,77%	92,48%
10	31,51	35,0	33,3	5	129	3,76%	96,24%
11	35,01	38,5	36,8	1	130	0,75%	96,99%
12	38,51	42,0	40,3	2	132	1,50%	98,50%
13	42,01	45,5	43,8	2	134	1,50%	100,00%

Fuente: elaboración propia.

Figura 65. **Análisis de la frecuencia para el consumo de agua durante la cosecha 2012 – 2013**



Fuente: elaboración propia.

#### 4.4. **Propuestas de tratamiento evaluadas**

Los resultados obtenidos para las propuestas de tratamiento evaluadas se presentan en función de las evaluaciones realizadas a los modelos experimentales.

Cabe mencionar que cada una de las evaluaciones realizadas se ha conceptualizado como “modelo experimental” en función de sus condiciones de operación y el nivel de control de variables establecido, de tal forma que el primer modelo experimental corresponde a la primera evaluación del modelo físico en condiciones específicas y así sucesivamente.

#### **4.4.1. Ajuste del potencial de hidrógeno del agua miel mediante un modelo de lecho de roca caliza**

Los resultados obtenidos mediante las evaluaciones del modelo de lecho de roca caliza para ajuste del potencial de hidrógeno de las aguas mieles son:

##### **4.4.1.1. Primer modelo experimental de ajuste de pH**

El monitoreo del ajuste instantáneo del potencial de hidrógeno correspondiente al primer modelo experimental de ajuste de pH es el siguiente:

Tabla LIII. **Variación del potencial de hidrógeno para el primer modelo experimental de ajuste de pH**

Fecha	Descripción	Potencial de hidrógeno		
		Inicial	Final	Diferencial
13/02/2013	Agua miel cruda	4,83		
	Prueba # 1		7,13	2,30
	Prueba # 2		7,43	2,60

Fuente: elaboración propia.

##### **4.4.1.2. Segundo modelo experimental de ajuste de pH**

El monitoreo del ajuste instantáneo del potencial de hidrógeno correspondiente al segundo modelo experimental de ajuste de pH es el siguiente:



Tabla LIV. **Variación del potencial de hidrógeno para el segundo modelo experimental de ajuste de pH**

Fecha	Descripción	Potencial de hidrógeno		
		Inicial	Final	Diferencial
19/02/2013	Agua miel cruda	4,93		
	Prueba # 1		5,88	0,95
	Prueba # 2		6,25	1,32
	Prueba # 3		6,18	1,25

Fuente: elaboración propia.

El cálculo de las cargas hidráulicas correspondientes a las pruebas realizadas para el presente modelo experimental es el siguiente:

Tabla LV. **Cálculo de la carga hidráulica para la prueba # 1**

Tiempo (s)	Diámetro del lecho de roca caliza (m)	Volumen (ml)	Área del lecho (m <sup>2</sup> )	Caudal (ml/d)	Carga hidráulica, Q/A (m/d)	Altura del medio (m)
3,56	0,0762	200,00	0,00456	733 446,52	160,8306	0,50

Fuente: elaboración propia.

Tabla LVI. **Cálculo de la carga hidráulica para la prueba # 2**

Tiempo (s)	Diámetro del lecho de roca caliza (m)	Volumen (ml)	Área del lecho (m <sup>2</sup> )	Caudal (ml/d)	Carga hidráulica, Q/A (m/d)	Altura del medio (m)
66	0,0762	200,00	0,00456	261 818,18	57,4116	1,00

Fuente: elaboración propia.

#### 4.4.1.3. Tercer modelo experimental de ajuste de pH

El monitoreo del ajuste instantáneo del potencial de hidrógeno correspondiente al tercer modelo experimental de ajuste de pH es el siguiente:

Tabla LVII. **Variación del potencial de hidrógeno para el tercer modelo experimental de ajuste de pH**

Fecha	Descripción	Potencial de hidrógeno		
		Inicial	Final	Diferencial
25/02/2013	Agua miel cruda	5,47		
	Prueba # 1		5,86	0,39
	Prueba # 2		6,00	0,53
	Prueba # 3		5,76	0,29
	Prueba # 4		6,12	0,65
	Prueba # 5		6,11	0,64

Fuente: elaboración propia.

El cálculo de las cargas hidráulicas correspondientes a las pruebas realizadas para el presente modelo experimental es el siguiente:

**Tabla LVIII. Cálculo de la carga hidráulica para la prueba # 1**

Tiempo (s)	Diámetro del lecho de roca caliza (m)	Volumen (ml)	Área del lecho (m <sup>2</sup> )	Caudal (ml/d)	Carga hidráulica, Q/A (m/d)	Altura del medio (m)
231,60	0,0762	288,00	0,00456	107 440,41	23,5596	1,5000

Fuente: elaboración propia.

**Tabla LIX. Cálculo de la carga hidráulica para la prueba # 2**

Tiempo (s)	Diámetro del lecho de roca caliza (m)	Volumen (ml)	Área del lecho (m <sup>2</sup> )	Caudal (ml/d)	Carga hidráulica, Q/A (m/d)	Altura del medio (m)
106,10	0,0762	34,00	0,00456	27 687,09	6,0712	1,5000

Fuente: elaboración propia.

**Tabla LX. Cálculo de la carga hidráulica para la prueba # 3**

Tiempo (s)	Diámetro del lecho de roca caliza (m)	Volumen (ml)	Área del lecho (m <sup>2</sup> )	Caudal (ml/d)	Carga hidráulica, Q/A (m/d)	Altura del medio (m)
157,97	0,0762	900,00	0,00456	492 245,36	107,9398	1,00

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXI. **Cálculo de la carga hidráulica para la prueba # 4**

Tiempo (s)	Diámetro del lecho de roca caliza (m)	Volumen (ml)	Área del lecho (m <sup>2</sup> )	Caudal (ml/d)	Carga hidráulica, Q/A (m/d)	Altura del medio (m)
90,35	0,0762	198,00	0,00456	189 343,66	41,5194	1,00

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXII. **Cálculo de la carga hidráulica para la prueba # 5**

Tiempo (s)	Diámetro del lecho de roca caliza (m)	Volumen (ml)	Área del lecho (m <sup>2</sup> )	Caudal (ml/d)	Carga hidráulica, Q/A (m/d)	Altura del medio (m)
120,00	0,0762	120,00	0,00456	86 400,00	18,9458	1,00

Fuente: elaboración propia.

#### 4.4.1.4. **Cuarto modelo experimental de ajuste de pH**

El monitoreo del ajuste instantáneo del potencial de hidrógeno correspondiente al cuarto modelo experimental de ajuste de pH es el siguiente:

Tabla LXIII. **Variación del potencial de hidrógeno para el cuarto modelo experimental de ajuste de pH**

Fecha	Descripción	Potencial de hidrógeno		
		Inicial	Final	Diferencial
26/02/2013	Agua miel cruda	4,96		
	Prueba # 1		5,86	0,90
	Prueba # 2		6,26	1,30
	Prueba # 3		6,23	1,27
	Prueba # 4		6,05	1,09
	Prueba # 5		6,03	1,07

Fuente: elaboración propia.

El cálculo de las cargas hidráulicas correspondientes a las pruebas realizadas para el presente modelo experimental es el siguiente:

Tabla LXIV. **Cálculo de la carga hidráulica para la prueba # 1**

Tiempo (s)	Diámetro del lecho de roca caliza (m)	Volumen (ml)	Área del lecho (m <sup>2</sup> )	Caudal (ml/d)	Carga hidráulica, Q/A (m/d)	Altura del medio (m)
34,24	0,0762	192,00	0,00456	484 485,98	106,238	1,000

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXV. **Cálculo de la carga hidráulica para la prueba # 2**

Tiempo (s)	Diámetro del lecho de roca caliza (m)	Volumen (ml)	Área del lecho (m <sup>2</sup> )	Caudal (ml/d)	Carga hidráulica, Q/A (m/d)	Altura del medio (m)
149,60	0,0762	50,00	0,00456	28 877,01	6,332	1,500

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXVI. **Cálculo de la carga hidráulica para la prueba # 3**

Tiempo (s)	Diámetro del lecho de roca caliza (m)	Volumen (ml)	Área del lecho (m <sup>2</sup> )	Caudal (ml/d)	Carga hidráulica, Q/A (m/d)	Altura del medio (m)
489,10	0,0762	50,00	0,00456	8 832,55	1,937	1,500

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXVII. **Cálculo de la carga hidráulica para la prueba # 4**

Tiempo (s)	Diámetro del lecho de roca caliza (m)	Volumen (ml)	Área del lecho (m <sup>2</sup> )	Caudal (ml/d)	Carga hidráulica, Q/A (m/d)	Altura del medio (m)
101,50	0,0762	50,00	0,00456	42 561,58	9,333	1,830

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXVIII. **Cálculo de la carga hidráulica para la prueba # 5**

Tiempo (s)	Diámetro del lecho de roca caliza (m)	Volumen (ml)	Área del lecho (m <sup>2</sup> )	Caudal (ml/d)	Carga hidráulica, Q/A (m/d)	Altura del medio (m)
123,30	0,0762	50,00	0,00456	35 036,50	7,683	1,830

Fuente: elaboración propia.

#### 4.4.2. Tratamiento biológico mediante el uso del modelo de laguna facultativa a escala de laboratorio

Los resultados obtenidos mediante las evaluaciones del modelo de laguna facultativa para la remoción de la carga contaminante de las aguas mieles son:

##### 4.4.2.1. Primer modelo experimental

El modelo se diseñó empleando los siguientes datos de partida:

Tabla LXIX. **Datos de partida para el diseño del primer modelo experimental mediante el método de carga máxima por radiación solar**

MES	Insolación solar kW-hrs/m <sup>2</sup> -día	kJ/ha-día	Eficiencia de algas	CSm (kg O <sub>2</sub> / ha-día)	Área de la planta piloto (m <sup>2</sup> )	Área de la planta piloto (ha)
enero	5,18	1,86E+08	0,03	361,21	0,6	0,00006
febrero	5,73	2,06E+08	0,03	399,56	0,6	0,00006
marzo	6,02	2,17E+08	0,03	419,79	0,6	0,00006
abril	6,05	2,18E+08	0,03	421,88	0,6	0,00006

Continuación de la tabla LXIX.

mayo	5,48	1,97E+08	0,03	382,13	0,6	0,00006
junio	5,16	1,86E+08	0,03	359,82	0,6	0,00006
julio	5,45	1,96E+08	0,03	380,04	0,6	0,00006
agosto	5,34	1,92E+08	0,03	372,37	0,6	0,00006
septiembre	4,73	1,70E+08	0,03	329,83	0,6	0,00006
octubre	4,76	1,71E+08	0,03	331,92	0,6	0,00006
noviembre	4,90	1,76E+08	0,03	341,69	0,6	0,00006
diciembre	4,95	1,78E+08	0,03	345,17	0,6	0,00006

MES	Área de la planta piloto (ha)	Carga diaria (kg de DBO /día)	Carga (mg de DBO/día)	Volumen de descarga (l)	Concentración sugerida máxima (mg DBO/litro-litro)
enero	0,00006	0,021672645	21 672,65	14,21	1 525,40
febrero	0,00006	0,023973795	23 973,80	14,21	1 687,37
marzo	0,00006	0,025187128	25 187,13	14,21	1 772,77
abril	0,00006	0,025312646	25 312,65	14,21	1 781,60
mayo	0,00006	0,022927818	22 927,82	14,21	1 613,75
junio	0,00006	0,021588967	21 588,97	14,21	1 519,51
julio	0,00006	0,022802301	22 802,30	14,21	1 604,91
agosto	0,00006	0,022342071	22 342,07	14,21	1 572,52
septiembre	0,00006	0,019789887	19 789,89	14,21	1 392,89
octubre	0,00006	0,019915404	19 915,40	14,21	1 401,72
noviembre	0,00006	0,020501151	20 501,15	14,21	1 442,95
diciembre	0,00006	0,020710346	20 710,35	14,21	1 457,67

Fuente: <http://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi?uid=0>. Consulta: 15 de abril de 2013.



Los cálculos para la determinación de la descarga de agua miel que se aplicó al primer modelo experimental son los siguientes:

Tabla LXX. **Descarga de agua miel a aplicar al primer modelo experimental**

DQO del agua	2 620,00	mg/l
relación DBO/DQO típico de las aguas mieles	0,68	
Valor esperado de DBO <sub>5</sub> descargado =	1 781,60	mg/l
Cantidad de litros de la descarga	14,21	l

Fuente: elaboración propia.

#### **4.4.2.1.1. Monitoreo de la DBO<sub>5</sub> para los parámetros iniciales del modelo**

El monitoreo del oxígeno disuelto para el período de muestro correspondiente a los parámetros iniciales del primer modelo experimental de tratamiento biológico es el siguiente:

Tabla LXXI. **Monitoreo del oxígeno disuelto para cálculo de la DBO<sub>5</sub>**

Descripción de la muestra	Porcentaje de dilución DBO	Fechas			
		16-abr	17-abr	22-abr	23-abr
Laguna	5,0%	6,60		4,50	4,62
Descarga	1,0%	6,69		4,70	5,11
Muestra 16-abr	1,0%	6,58		4,93	4,94
Muestra 18-abr	1,0%		6,83	5,57	5,57
Muestra 22-abr	1,0%			7,01	6,63
Muestra 23-abr	1,0%				6,66
Descripción de la muestra	Porcentaje de dilución DBO	Fechas			
		24-abr	25-abr	26-abr	29-abr
Laguna	5,0%	4,88	5,13	5,34	4,51
Descarga	1,0%	5,43	5,67	5,99	6,68
Muestra 16-abr	1,0%	5,04	5,13	5,29	5,40
Muestra 18-abr	1,0%	5,38	5,42	5,57	5,61
Muestra 22-abr	1,0%	6,45	6,28	6,17	5,87
Muestra 23-abr	1,0%	6,48	6,26	6,14	5,79
Descripción de la muestra	Porcentaje de dilución DBO	Fechas			
		30-abr	02-may	06-may	07-may
Laguna	5,0%	4,31	5,6	7,01	
Descarga	1,0%	6,75	6,92	7,06	
Muestra 16-abr	1,0%	5,83	6,04	6,01	6,08
Muestra 18-abr	1,0%	5,82	6,06	6,19	6,41
Muestra 22-abr	1,0%	6,01	6,38	6,95	6,94
Muestra 23-abr	1,0%	5,89	6,11	6,28	6,53

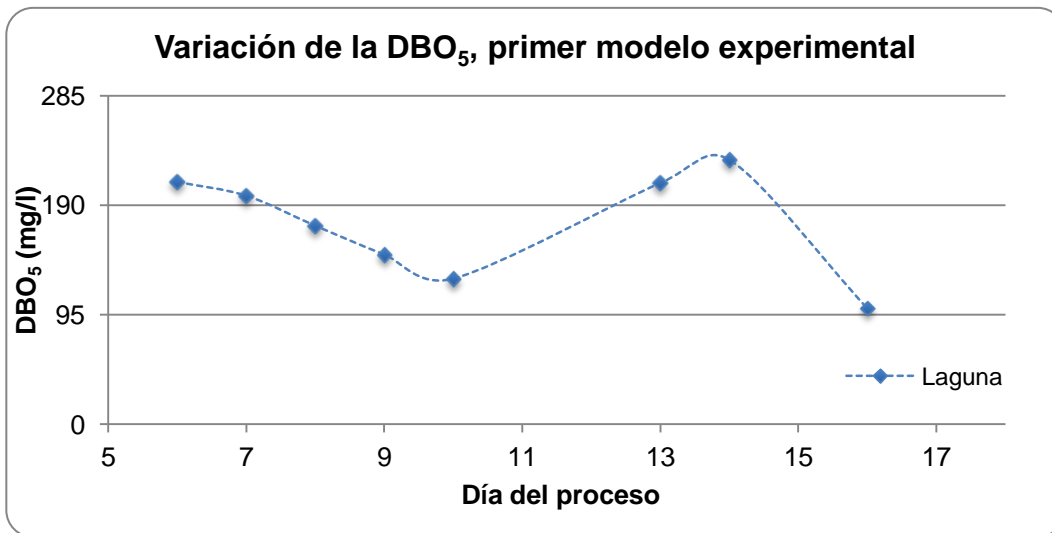
Fuente: elaboración propia.

Tabla LXXII. **Variación de la DBO<sub>5</sub> en el primer modelo experimental**

Fecha de la toma	Fecha del monitoreo	Día del proceso	DBO <sub>5</sub> (mg/l)
16-abr	22-abr	6	210
16-abr	23-abr	7	198
16-abr	24-abr	8	172
16-abr	25-abr	9	147
16-abr	26-abr	10	126
16-abr	29-abr	13	209
16-abr	30-abr	14	229
16-abr	02-may	16	100

Fuente: elaboración propia.

Figura 66. **Variación de la DBO<sub>5</sub> en el primer modelo experimental**



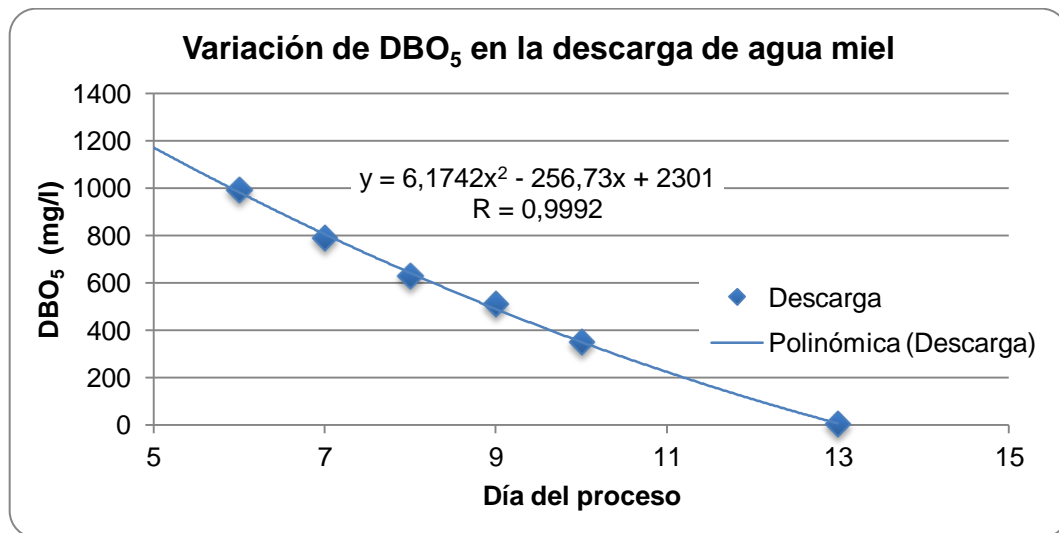
Fuente: elaboración propia.

Tabla LXXIII. **Variación de la DBO<sub>5</sub> en la descarga de agua miel**

Fecha de la toma	Fecha del monitoreo	Día del proceso	DBO <sub>5</sub> (mg/l)	Fecha de la toma	Fecha del monitoreo	Día del proceso	DBO <sub>5</sub> (mg/l)
16-abr	22-abr	6	995	16-abr	25-abr	9	510
16-abr	23-abr	7	790	16-abr	26-abr	10	350
16-abr	24-abr	8	630	16-abr	29-abr	13	5

Fuente: elaboración propia.

Figura 67. **Variación de la DBO<sub>5</sub> en la descarga de agua miel del primer modelo experimental**



Fuente: elaboración propia.

**4.4.2.1.2. Características del agua tratada, efluente del modelo a escala de planta piloto**

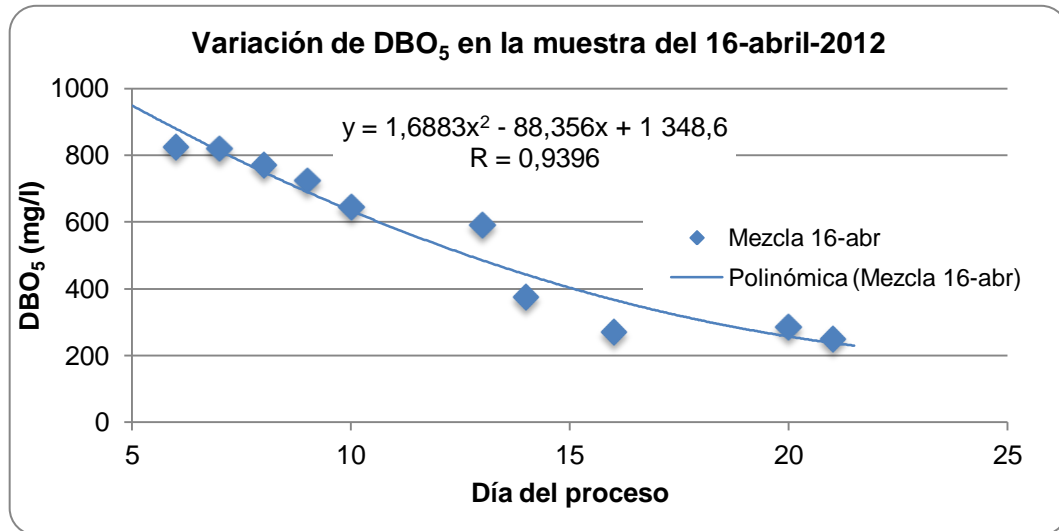
El monitoreo del oxígeno disuelto para el período de muestro correspondiente al primer modelo experimental de tratamiento biológico es el siguiente:

Tabla LXXIV. **Variación de la DBO<sub>5</sub> para la muestra del 16-abril-2012**

Fecha de la toma	Fecha del monitoreo	Día del proceso	DBO <sub>5</sub> (mg/l)	Fecha de la toma	Fecha del monitoreo	Día del proceso	DBO <sub>5</sub> (mg/l)
16-abr	22-abr	6	825	16-abr	29-abr	13	590
16-abr	23-abr	7	820	16-abr	30-abr	14	375
16-abr	24-abr	8	770	16-abr	02-may	16	270
16-abr	25-abr	9	725	16-abr	06-may	20	285
16-abr	26-abr	10	645	16-abr	07-may	21	250

Fuente: elaboración propia.

Figura 68. **Variación de la DBO<sub>5</sub> en la muestra tomada el 16-abril-2012**



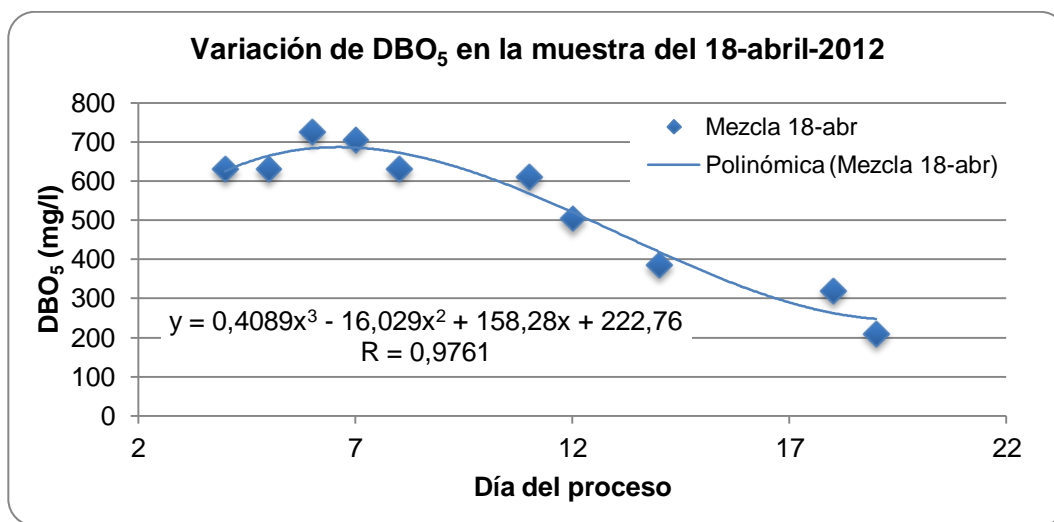
Fuente: elaboración propia.

Tabla LXXV. **Variación de la DBO<sub>5</sub> para la muestra del 18-abril-2012**

Fecha de la toma	Fecha del monitoreo	Día del proceso	DBO <sub>5</sub> (mg/l)	Fecha de la toma	Fecha del monitoreo	Día del proceso	DBO <sub>5</sub> (mg/l)
18-abr	22-abr	4	630	18-abr	29-abr	11	610
18-abr	23-abr	5	630	18-abr	30-abr	12	505
18-abr	24-abr	6	725	18-abr	02-may	14	385
18-abr	25-abr	7	705	18-abr	06-may	18	320
18-abr	26-abr	8	630	18-abr	07-may	19	210

Fuente: elaboración propia.

Figura 69. **Variación de la DBO<sub>5</sub> en la muestra tomada el 18-abril-2012**



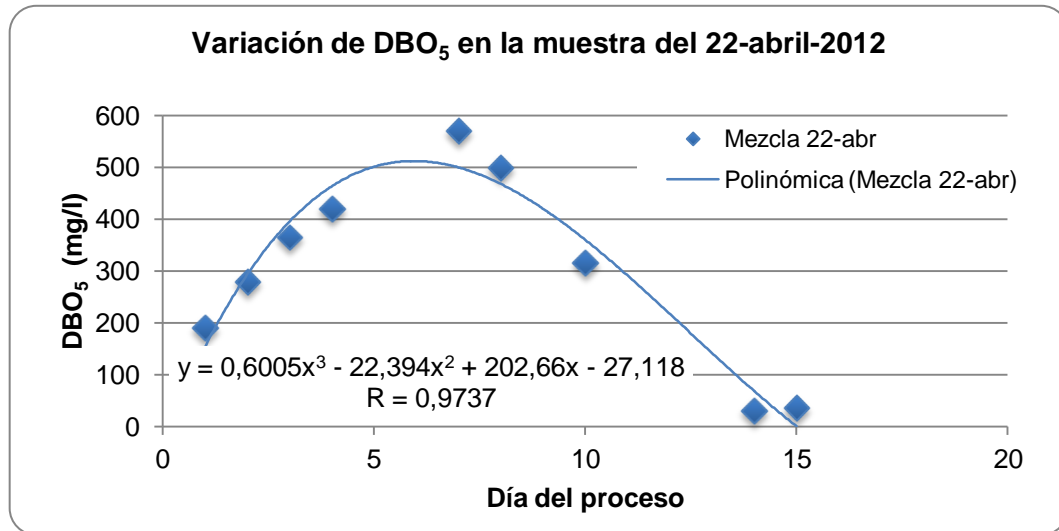
Fuente: elaboración propia.

Tabla LXXVI. **Variación de la DBO<sub>5</sub> para la muestra del 22-abril-2012**

Fecha de la toma	Fecha del monitoreo	Día del proceso	DBO <sub>5</sub> (mg/l)
22-abr	23-abr	1	190
22-abr	24-abr	2	280
22-abr	25-abr	3	365
22-abr	26-abr	4	420
22-abr	29-abr	7	570
22-abr	30-abr	8	500
22-abr	02-may	10	315
22-abr	06-may	14	30
22-abr	07-may	15	35

Fuente: elaboración propia.

Figura 70. **Variación de la DBO<sub>5</sub> en la muestra tomada el 22-abril-2012**



Fuente: elaboración propia.

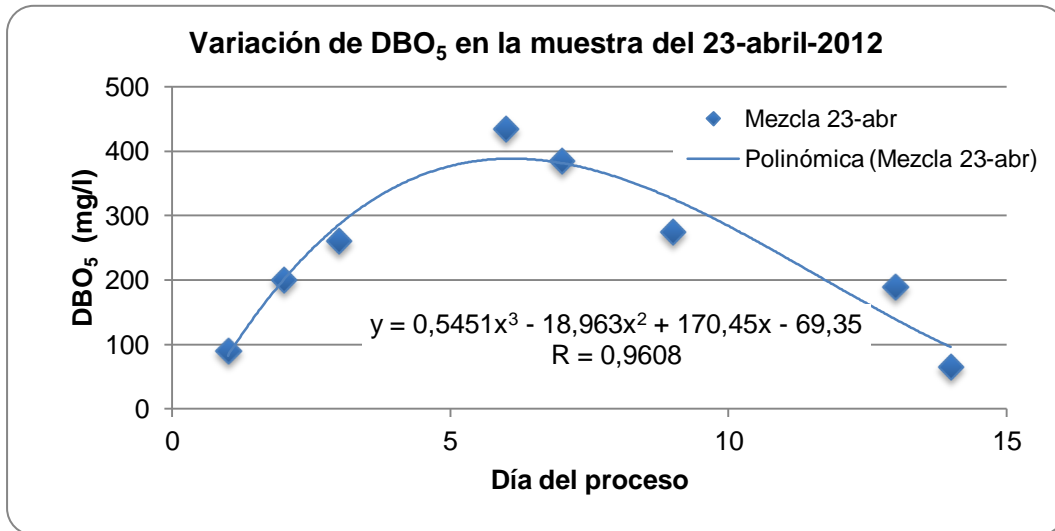
Tabla LXXVII. **Variación de la DBO<sub>5</sub> para la muestra del 23-abril-2012**

Fecha de la toma	Fecha del monitoreo	Día del proceso	DBO <sub>5</sub> (mg/l)	Fecha de la toma	Fecha del monitoreo	Día del proceso	DBO <sub>5</sub> (mg/l)
23-abr	24-abr	1	90	23-abr	30-abr	7	385
23-abr	25-abr	2	200	23-abr	02-may	9	275
23-abr	26-abr	3	260	23-abr	06-may	13	190
23-abr	29-abr	6	435	23-abr	07-may	14	65

Fuente: elaboración propia.



Figura 71. Variación de la DBO<sub>5</sub> en la muestra tomada el 23-abril-2012



Fuente: elaboración propia.

#### 4.4.2.1.3. Eficiencia de la unidad de tratamiento

Para el cálculo de la eficiencia de la unidad de tratamiento se considera la DBO<sub>5</sub> de cada una de las muestras de agua analizadas durante el período de muestreo, obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla LXXVIII. **Cálculo de la DBO<sub>5</sub> para el período de muestreo**

Valores de DBO <sub>5</sub> generados	Día del proceso	DBO <sub>5</sub> (mg/l)	Ecuaciones
Descarga agua miel	5	1 171,71	$y = 6,1742x^2 - 256,73x + 2301$
Muestra 16-abril	5	949,03	$y = 1,6883x^2 - 88,356x + 1348,6$
Muestra 22-abril	5	501,39	$y = 0,6005x^3 - 22,394x^2 + 202,66x - 27,118$
Muestra 23-abril	5	857,07	$y = 0,5451x^3 - 18,963x^2 + 170,45x - 69,35$

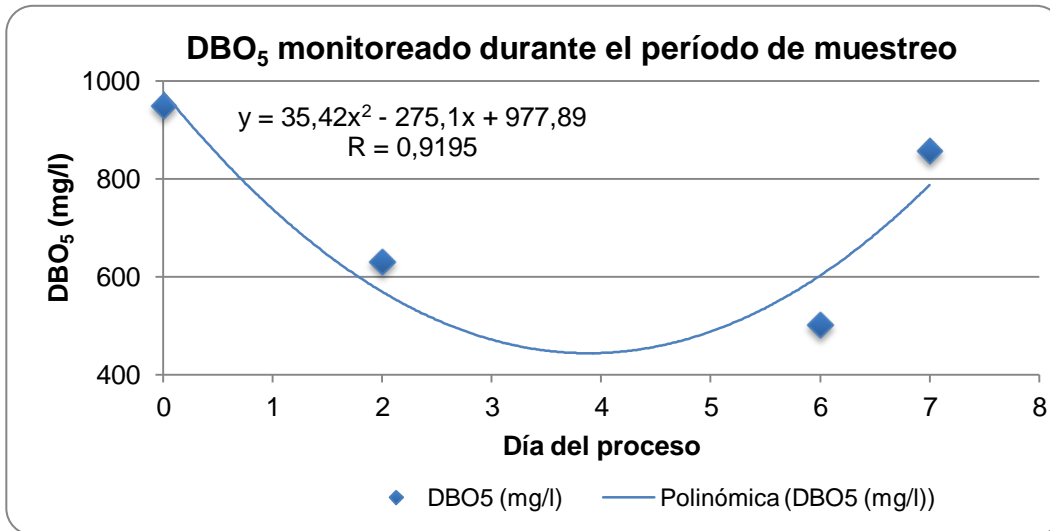
Fuente: elaboración propia.

Tabla LXXIX. **Eficiencia de remoción de DBO<sub>5</sub> de la unidad de tratamiento**

Tomas de muestra	Fecha de la toma de muestra	Día del proceso	DBO <sub>5</sub> (mg/l)	DBO remanente	Eficiencia
1	16-abr-2012	0	949,03	100,00%	0,00%
2	18-abr-2012	2	630,00	66,38%	33,62%
3	22-abr-2012	6	501,39	52,83%	47,17%
4	23-abr-2012	7	857,07	90,31%	9,69%

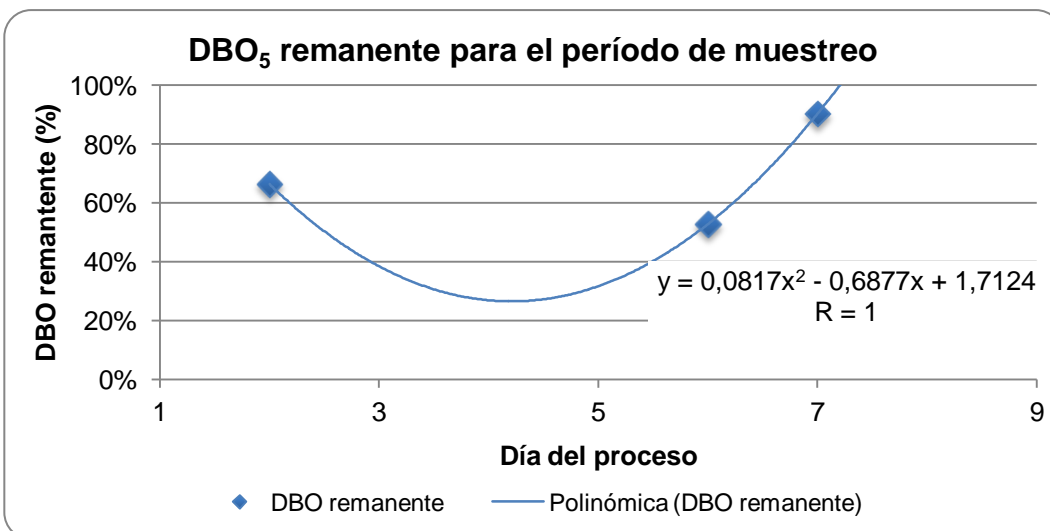
Fuente: elaboración propia.

Figura 72. **DBO<sub>5</sub> monitoreado durante el período de muestreo**



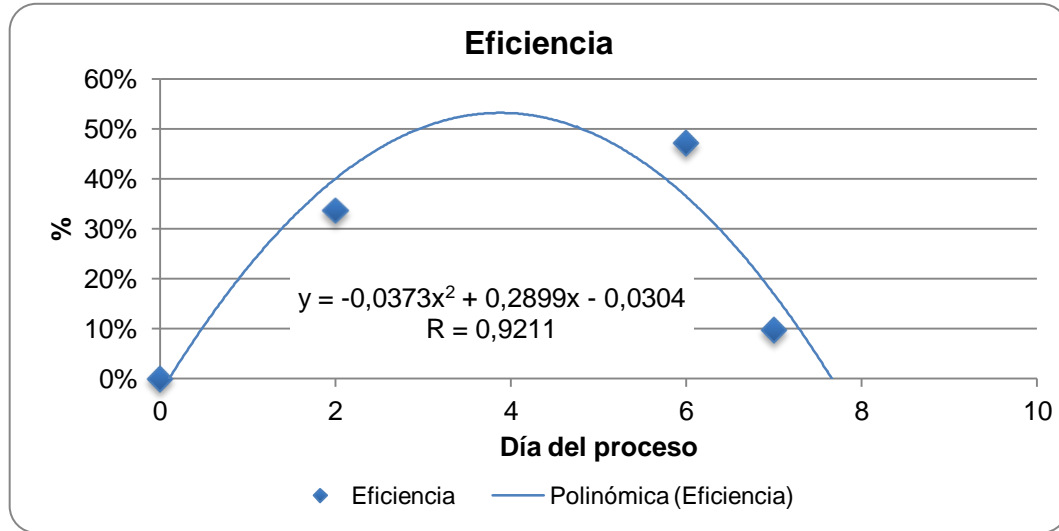
Fuente: elaboración propia.

Figura 73. **DBO<sub>5</sub> remanente para el período de muestreo**



Fuente: elaboración propia.

Figura 74. **Eficiencia de remoción de DBO<sub>5</sub> de la unidad de tratamiento**



Fuente: elaboración propia.

La máxima eficiencia esperada para el primer modelo experimental es:

Tabla LXXX. **Máxima eficiencia esperada, primer modelo experimental**

Proyección de eficiencia	Retención hidráulica requerida (día)	Retención hidráulica requerida (horas)	Eficiencia esperada
Máxima eficiencia	3,90	93,60	53,29%
Ecuación	$y = -0,0373x^2 + 0,2899x - 0,0304$		

Fuente: elaboración propia.

#### 4.4.2.1.4. Monitoreo de otros parámetros

El monitoreo de algunos otros parámetros durante el período de muestreo es:

Tabla LXXXI. **Otros parámetros, primer modelo experimental**

Característica	F e c h a			
	16-abr	18-abr	22-abr	23-abr
Oxígeno disuelto (mg/l)	7,28	5,66	3,87	7,63
Sólido disueltos totales (mg/l)	775,00	577,67	608,67	657,67
Conductividad Eléctrica (μS/cm)	1 461,33	1 121,00	1 212,67	1 336,67
Temperatura del agua (°C)	26,13	26,47	27,63	28,87
Salinidad	0,53	0,30	0,37	0,47
Potencial de Hidrógeno	6,58		8,31	8,34
Día del proceso	0	2	6	7
Eficiencia de remoción de DBO soluble (mg/l)	0	33,62%	47,17%	9,69%

Fuente: elaboración propia.

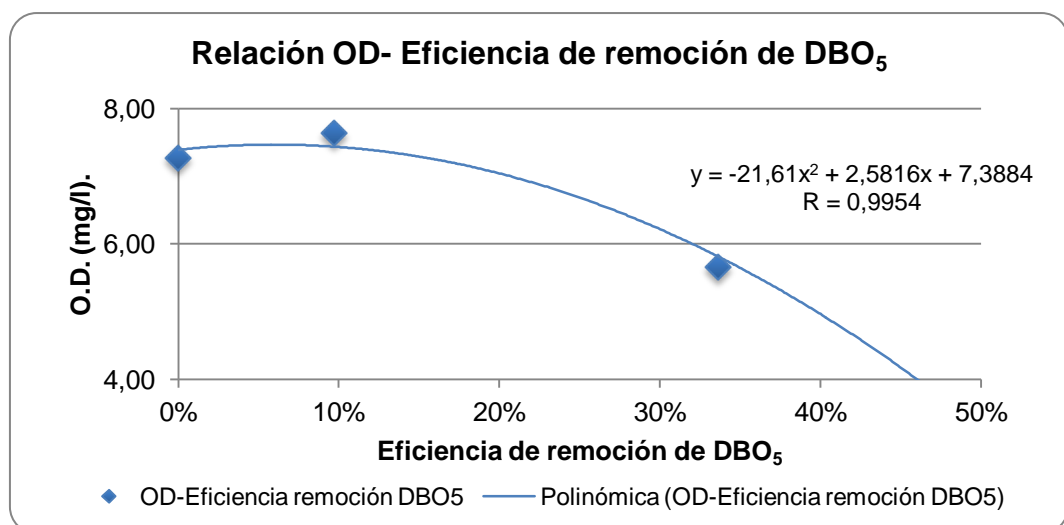
La correlación de los parámetros monitoreados con la eficiencia de remoción de DBO<sub>5</sub> de la unidad de tratamiento es la siguiente:

Tabla LXXXII. **Coefficientes de correlación lineal entre otros parámetros y la eficiencia de remoción de DBO<sub>5</sub> de la unidad de tratamiento**

N°	Fecha	Eficiencia de remoción del proceso (%)	OD (mg/l)	SDT (mg/l)	CE (µS/cm)	Salinidad	pH
1	16-abr	0,00%	7,28	775,00	1 461,33	0,53	6,58
2	18-abr	33,62%	5,66	577,67	1 121,00	0,30	
3	22-abr	47,17%	3,87	608,67	1 212,67	0,37	8,31
4	23-abr	9,69%	7,63	657,67	1 336,67	0,47	8,34
Coeficiente de correlación Pearson			0,9491	0,8426	0,8569	0,8622	0,6476

Fuente: elaboración propia.

Figura 75. **Relación del oxígeno disuelto con la eficiencia de remoción de DBO<sub>5</sub> en la unidad de tratamiento**



Fuente: elaboración propia.

#### 4.4.2.2. Segundo modelo experimental

El modelo se diseñó empleando los siguientes datos de partida:

Tabla LXXXIII. **Datos de partida para el diseño del segundo modelo experimental mediante el método de carga máxima por radiación solar**

MES	Insolación solar kW-hrs/m <sup>2</sup> -día	kJ/ha-día	Eficiencia de algas	CSm (kg O <sub>2</sub> / ha-día)	Área de la planta piloto (m <sup>2</sup> )	Área de la planta piloto (ha)
abril	6,05	2,18E+08	0,03	421,88	0,6	0,00006

MES	Área de la planta piloto (ha)	Carga diaria (Kg de DBO /día)	Carga (mg de DBO/día)	Volumen de descarga (l)	Concentración sugerida máxima (mg DBO/litro-litro)
abril	0,00006	0,025312646	25 312,65	14,21	1 781,60

Fuente: <http://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi?uid=0>. Consulta: 22 de abril de 2013.

Los cálculos para la determinación de la descarga de agua miel que se aplicó al segundo modelo experimental son los siguientes:

Tabla LXXXIV. **Descarga de agua miel a aplicar al segundo modelo experimental**

DQO del agua	27 220,00	mg/l
relación DBO/DQO típico de las aguas mieles	0,68	
Valor esperado de DBO <sub>5</sub> descargado =	18 509,60	mg/l
Cantidad de litros de la descarga	0,31	l

Fuente: elaboración propia.

#### 4.4.2.2.1. Monitoreo de la DBO<sub>5</sub> para los parámetros iniciales del modelo

El monitoreo del oxígeno disuelto para el período de muestro correspondiente a los parámetros iniciales del segundo modelo experimental de tratamiento biológico es el siguiente:

Tabla LXXXV. **Monitoreo del oxígeno disuelto para cálculo de la DBO<sub>5</sub>**

Descripción de la muestra	Porcentaje de dilución DBO <sub>5</sub>	Fechas				
		23-abr	24-abr	25-abr	26-abr	29-abr
Laguna	5,0%	6,63		6,10	5,99	4,93
Descarga	0,5%	6,66		3,28	2,65	2,20
Mezcla 23-abr	0,5%		7,04	6,69	6,58	6,21
Mezcla 24-abr	0,5%		7,05	6,70	6,55	6,14
Mezcla 25-abr	1,0%			6,81	6,38	5,81
Mezcla 26-abr	0,5%				6,59	5,88
Mezcla 29-abr	0,5%					7,02



Continuación de la tabla LXXXV.

Descripción de la muestra	Porcentaje de Dilución DBO <sub>5</sub>	Fechas				
		30-abr	02-may	06-may	07-may	08-may
Laguna	5,0%	5,29	5,35	5,23	5,44	5,61
Descarga	0,5%	2,31	5,03	5,39	5,75	6,09
Mezcla 23-abr	0,5%	6,31	6,33	6,31	6,51	6,67
Mezcla 24-abr	0,5%	6,21	6,3	6,22	6,36	6,55
Mezcla 25-abr	1,0%	5,82	5,86	5,91	6,12	6,38
Mezcla 26-abr	0,5%	5,85	5,80	5,82	6,03	6,19
Mezcla 29-abr	0,5%	6,62	6,01	5,34	5,47	5,63
Mezcla 30-abr	0,5%	7,20	6,78	6,17	6,19	6,24
Mezcla 02-may	0,5%		7,04	6,38	6,26	6,27
Mezcla 06-may	0,5%			6,97	6,68	6,55

Descripción de la muestra	Porcentaje de Dilución DBO <sub>5</sub>	Fechas			
		09-may	10-may	13-may	14-may
Laguna	5,0%	5,40	5,80		
Descarga	0,5%	6,28	6,46		
Mezcla 23-abr	0,5%	6,75	6,82		
Mezcla 24-abr	0,5%	6,66	6,75		
Mezcla 25-abr	1,0%	6,50	6,53		
Mezcla 26-abr	0,5%	6,33	6,43		
Mezcla 29-abr	0,5%	5,80	5,98		
Mezcla 30-abr	0,5%	6,29	6,37		
Mezcla 02-may	0,5%	6,29	6,35		
Mezcla 06-may	0,5%	6,30	6,23	5,93	5,89

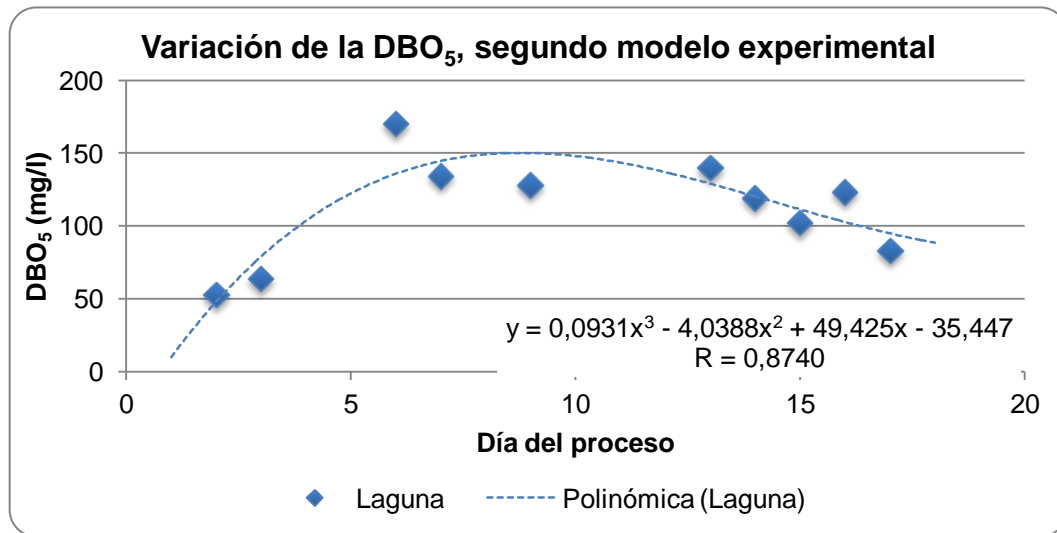
Fuente: elaboración propia.

Tabla LXXXVI. **Variación de la DBO<sub>5</sub> en el segundo modelo experimental**

Fecha de la toma	Fecha del monitoreo	Día del proceso	DBO <sub>5</sub> (mg/l)	Fecha de la toma	Fecha del monitoreo	Día del proceso	DBO <sub>5</sub> (mg/l)
23-abr	25-abr	2	53	23-abr	06-may	13	140
23-abr	26-abr	3	64	23-abr	07-may	14	119
23-abr	29-abr	6	170	23-abr	08-may	15	102
23-abr	30-abr	7	134	23-abr	09-may	16	123
23-abr	02-may	9	128	23-abr	10-may	17	83

Fuente: elaboración propia.

Figura 76. **Variación de la DBO<sub>5</sub> en el segundo modelo experimental**



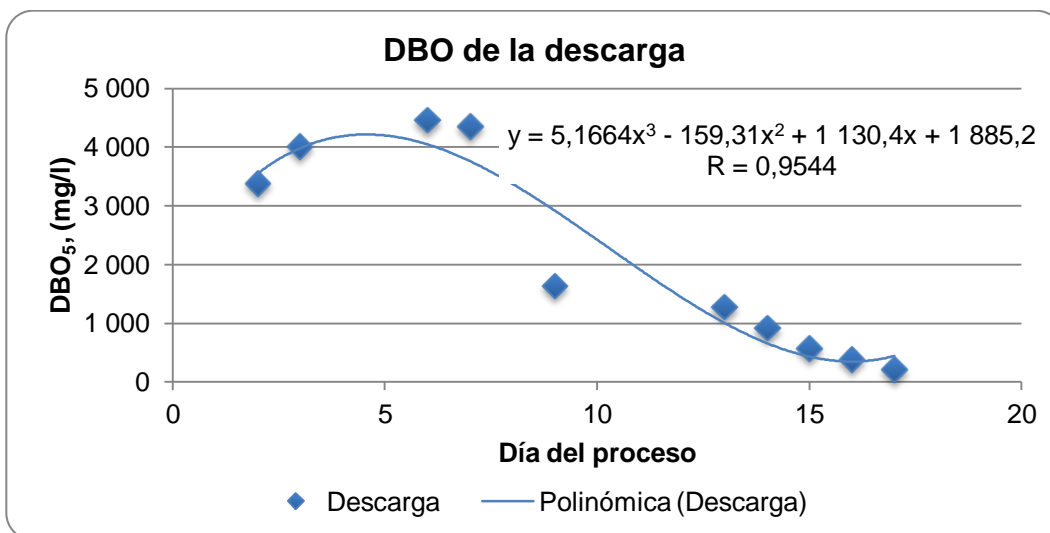
Fuente: elaboración propia.

Tabla LXXXVII. **Variación de la DBO<sub>5</sub> en la descarga de agua miel**

Fecha de la toma	Fecha del monitoreo	Día del proceso	DBO <sub>5</sub> (mg/l)	Fecha de la toma	Fecha del monitoreo	Día del proceso	DBO <sub>5</sub> (mg/l)
23-abr	25-abr	2	3 380	23-abr	06-may	13	1 270
23-abr	26-abr	3	4 010	23-abr	07-may	14	910
23-abr	29-abr	6	4 460	23-abr	08-may	15	570
23-abr	30-abr	7	4 350	23-abr	09-may	16	380
23-abr	02-may	9	1 630	23-abr	10-may	17	200

Fuente: elaboración propia.

Figura 77. **Variación de la DBO<sub>5</sub> en la descarga de agua miel del segundo modelo experimental**



Fuente: elaboración propia.

**4.4.2.2. Características del agua tratada, efluente del modelo a escala de planta piloto**

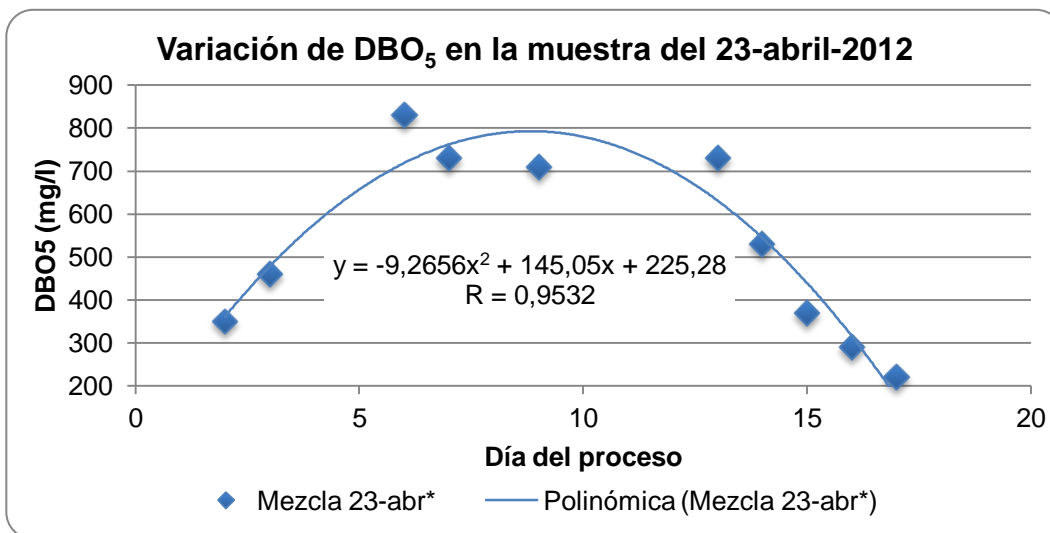
El monitoreo del oxígeno disuelto para el período de muestro correspondiente al segundo modelo experimental de tratamiento biológico es el siguiente:

Tabla LXXXVIII. **Variación de la DBO<sub>5</sub> para la muestra del 23-abril-2012**

Fecha de la toma	Fecha del monitoreo	Día del proceso	DBO <sub>5</sub> (mg/l)	Fecha de la toma	Fecha del monitoreo	Día del proceso	DBO <sub>5</sub> (mg/l)
23-abr	25-abr	1	350	23-abr	06-may	12	730
23-abr	26-abr	2	460	23-abr	07-may	13	530
23-abr	29-abr	5	830	23-abr	08-may	14	370
23-abr	30-abr	6	730	23-abr	09-may	15	290
23-abr	02-may	8	710	23-abr	10-may	16	220

Fuente: elaboración propia.

Figura 78. Variación de la DBO<sub>5</sub> en la muestra tomada el 23-abril-2012



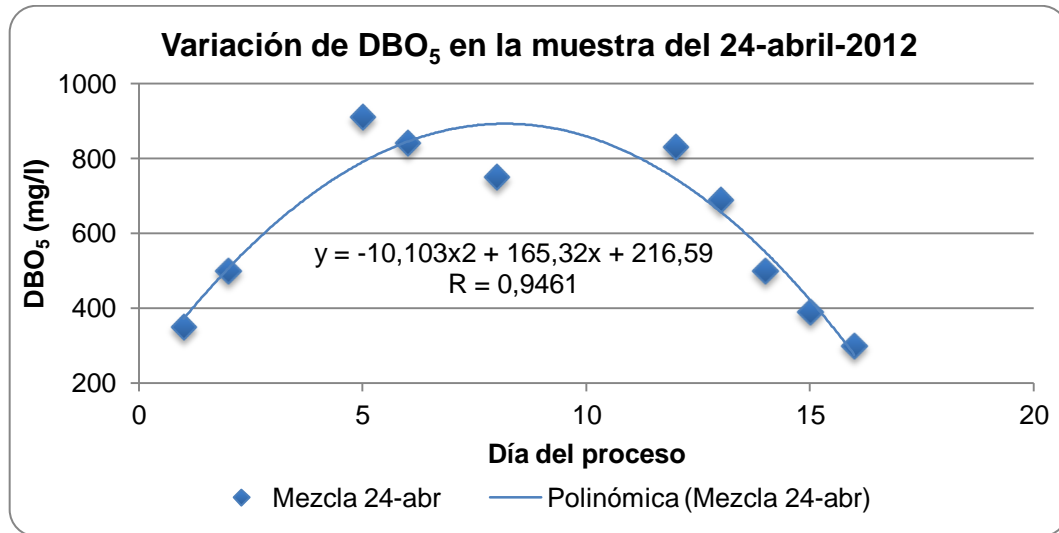
Fuente: elaboración propia.

Tabla LXXXIX. Variación de la DBO<sub>5</sub> para la muestra del 24-abril-2012

Fecha de la toma	Fecha del monitoreo	Día del proceso	DBO <sub>5</sub> (mg/l)	Fecha de la toma	Fecha del monitoreo	Día del proceso	DBO <sub>5</sub> (mg/l)
24-abr	25-abr	1	350	24-abr	06-may	12	830
24-abr	26-abr	2	500	24-abr	07-may	13	690
24-abr	29-abr	5	910	24-abr	08-may	14	500
24-abr	30-abr	6	840	24-abr	09-may	15	390
24-abr	02-may	8	750	24-abr	10-may	16	300

Fuente: elaboración propia.

Figura 79. Variación de la DBO<sub>5</sub> en la muestra tomada el 24-abril-2012



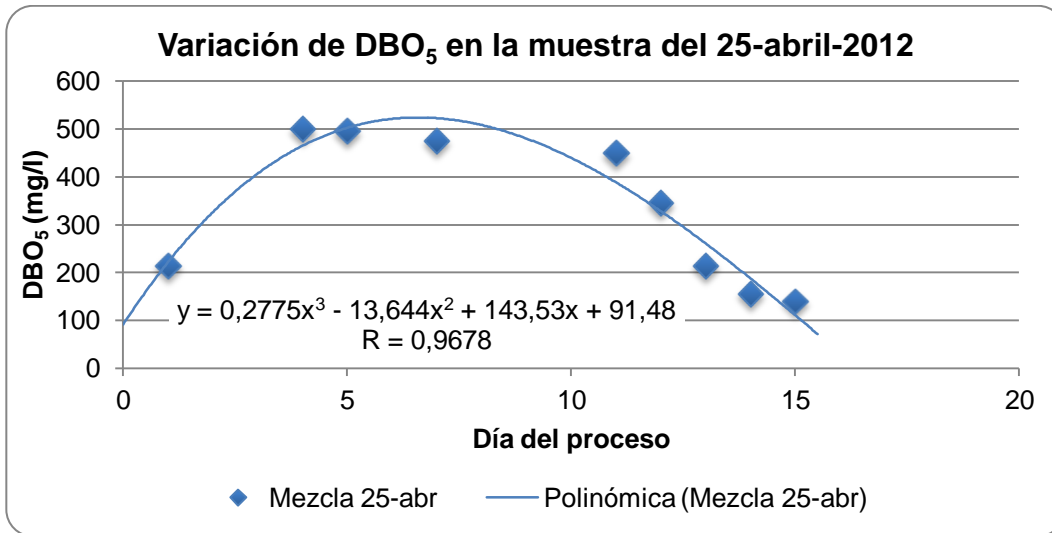
Fuente: elaboración propia.

Tabla XC. Variación de la DBO<sub>5</sub> para la muestra del 25-abril-2012

Fecha de la toma	Fecha del monitoreo	Día del proceso	DBO <sub>5</sub> (mg/l)	Fecha de la toma	Fecha del monitoreo	Día del proceso	DBO <sub>5</sub> (mg/l)
25-abr	26-abr	1	215	25-abr	07-may	12	345
25-abr	29-abr	4	500	25-abr	08-may	13	215
25-abr	30-abr	5	495	25-abr	09-may	14	155
25-abr	02-may	7	475	25-abr	10-may	15	140
25-abr	06-may	11	450				

Fuente: elaboración propia.

Figura 80. Variación de la DBO<sub>5</sub> en la muestra tomada el 25-abril-2012



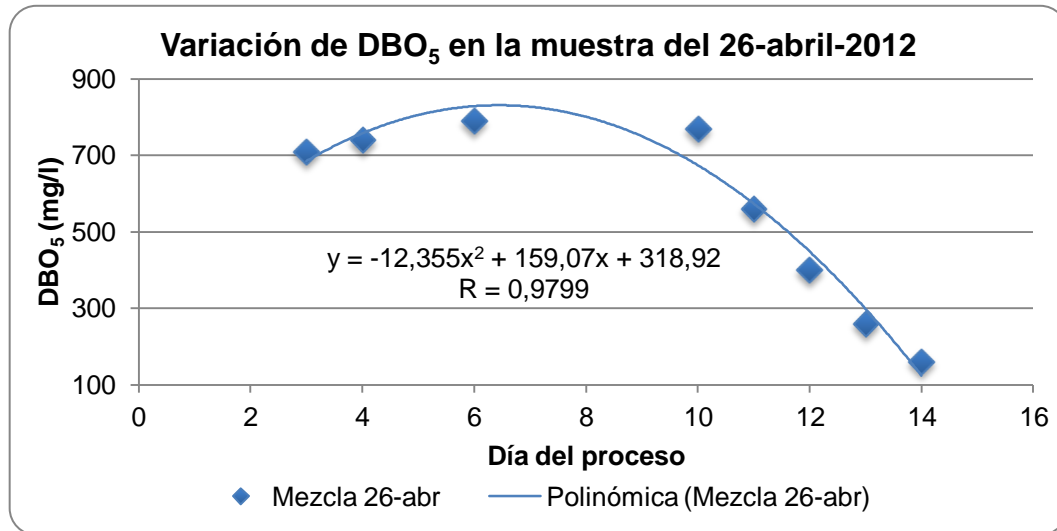
Fuente: elaboración propia.

Tabla XCI. Variación de la DBO<sub>5</sub> para la muestra del 26-abril-2012

Fecha de la toma	Fecha del monitoreo	Día del proceso	DBO <sub>5</sub> (mg/l)
26-abr	29-abr	3	710
26-abr	30-abr	4	740
26-abr	02-may	6	790
26-abr	06-may	10	770
26-abr	07-may	11	560
26-abr	08-may	12	400
26-abr	09-may	13	260
26-abr	10-may	14	160

Fuente: elaboración propia.

Figura 81. **Variación de la DBO<sub>5</sub> en la muestra tomada el 26-abril-2012**



Fuente: elaboración propia.

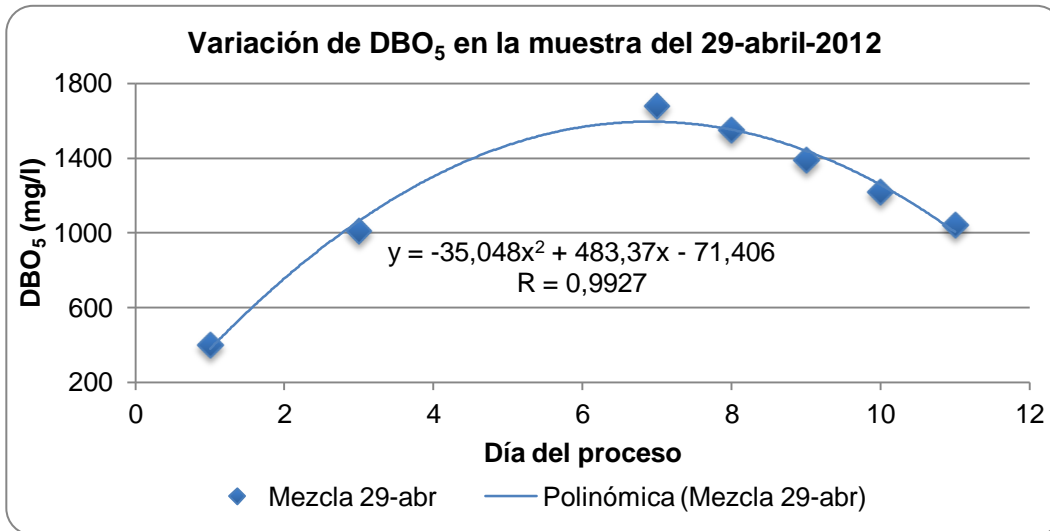
Tabla XCII. **Variación de la DBO<sub>5</sub> para la muestra del 29-abril-2012**

Fecha de la toma	Fecha del monitoreo	Día del proceso	DBO <sub>5</sub> (mg/l)
29-abr	30-abr	1	400
29-abr	02-may	3	1 010
29-abr	06-may	7	1 680
29-abr	07-may	8	1 550
29-abr	08-may	9	1 390
29-abr	09-may	10	1 220
29-abr	10-may	11	1 040

Fuente: elaboración propia.



Figura 82. **Variación de la DBO<sub>5</sub> en la muestra tomada el 29-abril-2012**



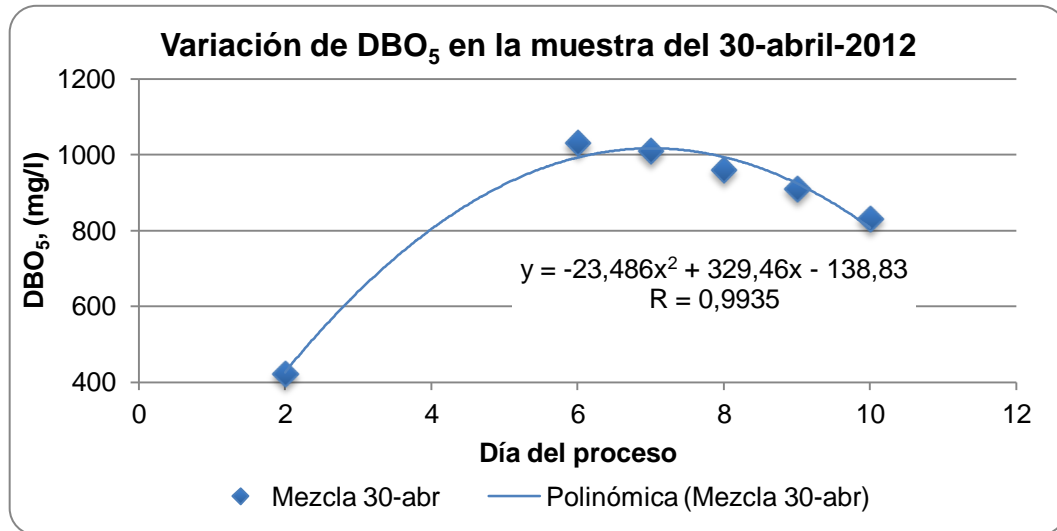
Fuente: elaboración propia.

Tabla XCIII. **Variación de la DBO<sub>5</sub> para la muestra del 30-abril-2012**

Fecha de la toma	Fecha del monitoreo	Día del proceso	DBO <sub>5</sub> (mg/l)	Fecha de la toma	Fecha del monitoreo	Día del proceso	DBO <sub>5</sub> (mg/l)
30-abr	02-may	2	420	30-abr	08-may	8	960
30-abr	06-may	6	1 030	30-abr	09-may	9	910
30-abr	07-may	7	1 010	30-abr	10-may	10	830

Fuente: elaboración propia.

Figura 83. **Variación de la DBO<sub>5</sub> en la muestra tomada el 30-abril-2012**



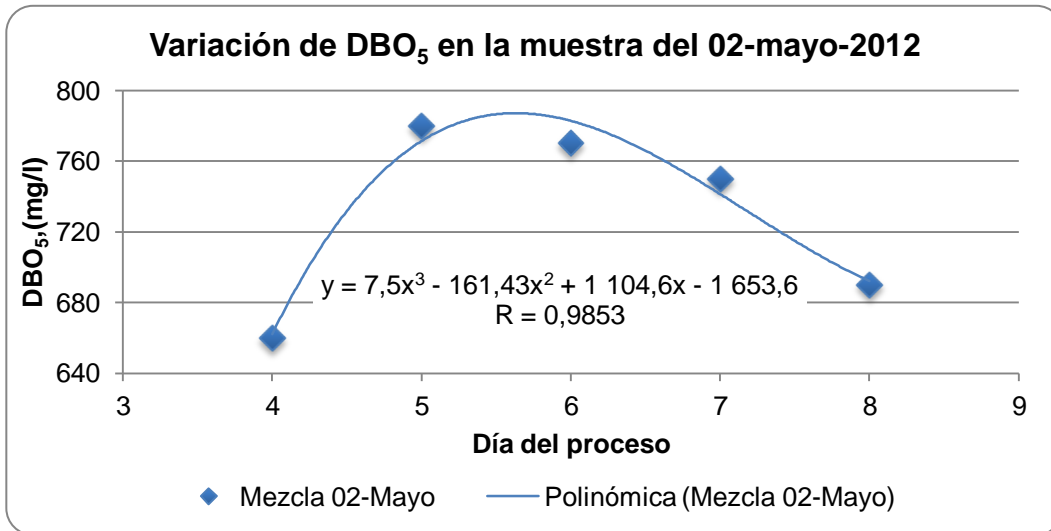
Fuente: elaboración propia.

Tabla XCIV. **Variación de la DBO<sub>5</sub> para la muestra del 02-mayo-2012**

Fecha de la toma	Fecha del monitoreo	Día del proceso	DBO <sub>5</sub> (mg/l)
02-may	06-may	4	660
02-may	07-may	5	780
02-may	08-may	6	770
02-may	09-may	7	750
02-may	10-may	8	690

Fuente: elaboración propia.

Figura 84. **Variación de la DBO<sub>5</sub> en la muestra tomada el 02-mayo-2012**



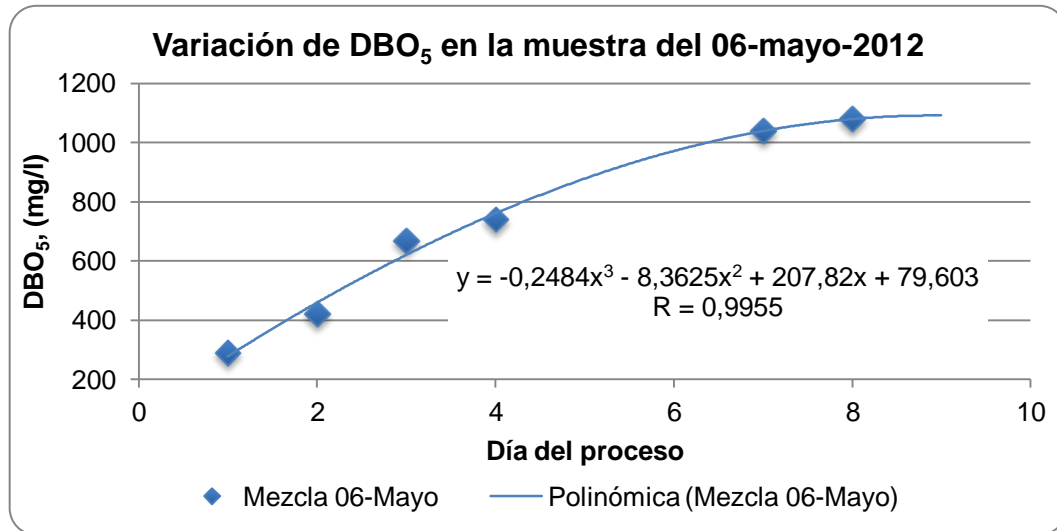
Fuente: elaboración propia.

Tabla XCV. **Variación de la DBO<sub>5</sub> para la muestra del 06-mayo-2012**

Fecha de la toma	Fecha del monitoreo	Día del proceso	DBO <sub>5</sub> (mg/l)
06-may	07-may	1	290
06-may	08-may	2	420
06-may	09-may	3	670
06-may	10-may	4	740
06-may	13-may	7	1 040
06-may	14-may	8	1 080

Fuente: elaboración propia.

Figura 85. Variación de la DBO<sub>5</sub> en la muestra tomada el 06-mayo-2012



Fuente: elaboración propia.

#### 4.4.2.2.3. Eficiencia de la unidad de tratamiento

Para el cálculo de la eficiencia de la unidad de tratamiento se considera la DBO<sub>5</sub> de cada una de las muestras de agua analizadas durante el período de muestreo, obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla XCVI. **Cálculo de la DBO<sub>5</sub> para el período de muestreo**

Valores de DBO <sub>5</sub> generados	Día del proceso	DBO <sub>5</sub> (mg/l)	Ecuaciones
Para la descarga	5	3 694,57	$y = 5,1664x^3 - 159,31x^2 + 1\ 130,4x + 1\ 885,2$
Muestra 26-abril	5	805,40	$y = -12,355x^2 + 159,07x + 318,92$
Muestra 29-abril	5	1 469,24	$y = -35,048x^2 + 483,37x - 71,406$
Muestra 06-mayo	5	855,00	$y = -0,2484x^3 - 8,3625x^2 + 207,82x + 79,603$

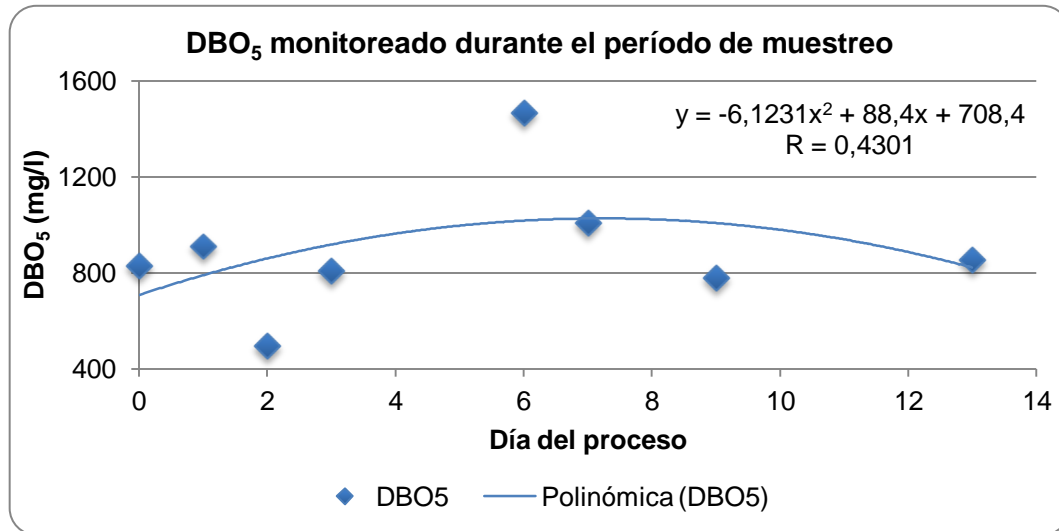
Fuente: elaboración propia.

Tabla XCVII. **Eficiencia de remoción de DBO<sub>5</sub> de la unidad de tratamiento**

Tomas de muestra	Fecha de la toma de muestra	Día del proceso	DBO <sub>5</sub> (mg/l)	DBO remanente	Eficiencia
1	23-abr-2012	0	830,00		
2	24-abr-2012	1	910,00	109,64%	-9,64%
3	25-abr-2012	2	495,00	59,64%	40,36%
4	26-abr-2012	3	805,40	97,04%	2,96%
5	29-abr-2012	6	1 469,24	177,02%	-77,02%
6	30-abr-2012	7	1 010,00	121,69%	-21,69%
7	02-may-2012	9	780,00	93,98%	6,02%
8	06-may-2012	13	855,00	103,01%	-3,01%

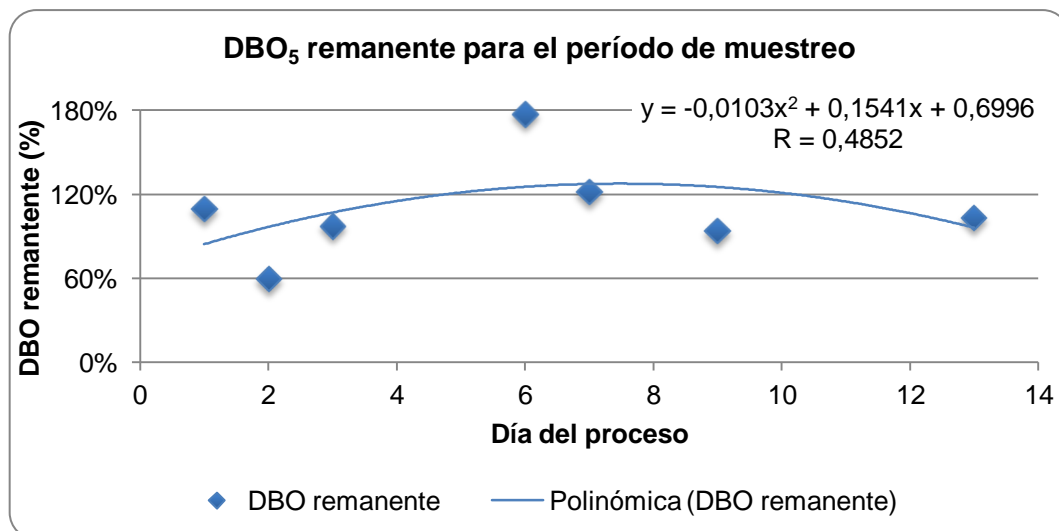
Fuente: elaboración propia.

Figura 86. **DBO<sub>5</sub> monitoreado durante el período de muestreo**



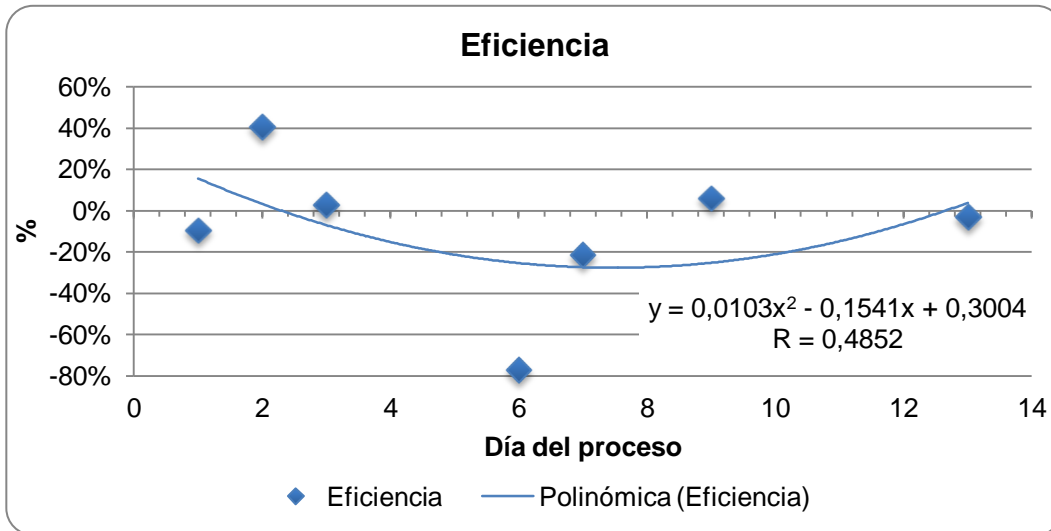
Fuente: elaboración propia.

Figura 87. **DBO<sub>5</sub> remanente para el período de muestreo**



Fuente: elaboración propia.

Figura 88. **Eficiencia de remoción de DBO<sub>5</sub> de la unidad de tratamiento**



Fuente: elaboración propia.

#### 4.4.2.3. Tercer modelo experimental

El modelo se diseñó empleando los siguientes datos de partida:

Tabla XCVIII. **Datos de partida para el diseño del tercer modelo experimental mediante el método de carga máxima por radiación solar**

MES	Insolación solar kW-hrs/m <sup>2</sup> -día	kJ/ha-día	Eficiencia de algas	CSm (kg O <sub>2</sub> / ha-día)	Área de la planta piloto (m <sup>2</sup> )	Área de la planta piloto (ha)
abril	6,05	2,18E+08	0,03	421,88	0,6	0,00006

Continuación de la tabla XCVIII.

MES	Área de la planta piloto (ha)	Carga diaria (Kg de DBO /día)	Carga (mg de DBO/día)	Volumen de descarga (l)	Concentración sugerida máxima (mg DBO/litro-litro)
abril	0,00006	0,025312646	25 312,65	14,21	1 781,60

Fuente: <http://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi?uid=0>. Consulta: 25 de abril de 2013.

Los cálculos para la determinación de la descarga de agua miel que se aplicó al tercer modelo experimental son los siguientes:

Tabla XCIX. **Descarga de agua miel a aplicar al primer modelo experimental**

DQO del agua	27 220,00	mg/l
relación DBO/DQO típico de las aguas mieles	0,68	
Valor esperado de DBO <sub>5</sub> descargado =	18 509,60	mg/l
Cantidad de litros de la descarga	1,37	l

Fuente: elaboración propia.

#### 4.4.2.3.1. Monitoreo de la DBO<sub>5</sub> para los parámetros iniciales del modelo

El monitoreo del oxígeno disuelto para el período de muestro correspondiente a los parámetros iniciales del tercer modelo experimental de tratamiento biológico es el siguiente:



Tabla C. **Monitoreo del oxígeno disuelto para cálculo de la DBO<sub>5</sub>**

Descripción de la muestra	Porcentaje de dilución	Fechas				
		26-abr	29-abr	30-abr	02-may	06-may
Laguna	5,0%	6,56	4,71	4,45	4,08	3,71
Muestra 26-abr	1,0%	6,57	4,32	4,36	4,38	4,36
Muestra 29-abr	1,0%		7,02	6,31	5,35	4,50
Muestra 30-abr	1,0%			7,2	6,89	6,43
Muestra 2-may	1,0%				7,02	6,60
Muestra 6-may	1,0%					6,96

Descripción de la muestra	Porcentaje de dilución	Fechas			
		07-may	08-may	09-may	10-may
Laguna	5,0%	5,42	5,62	5,71	5,81
Mezcla 26-abr	1,0%	4,73	5,20	5,47	5,74
Mezcla 29-abr	1,0%	4,62	4,89	5,13	5,35
Mezcla 30-abr	1,0%	6,37	6,37	6,34	6,32
Mezcla 2-may	1,0%	6,53	6,54	6,51	6,52
Mezcla 6-may	1,0%	6,58	6,47	6,22	5,94
Descripción de la muestra	Porcentaje de dilución	Fechas			
		13-may	14-may	15-may	17-may
Laguna	5,0%	5,08	5,26	5,72	6,06
Mezcla 26-abr	1,0%	5,33	5,38	5,70	6,04
Mezcla 29-abr	1,0%	4,59	4,56	4,99	5,31
Mezcla 30-abr	1,0%	6,14	6,21	6,20	5,49
Mezcla 2-may	1,0%	6,49	6,61	6,61	5,90
Mezcla 6-may	1,0%	4,88	5,38	5,56	5,61

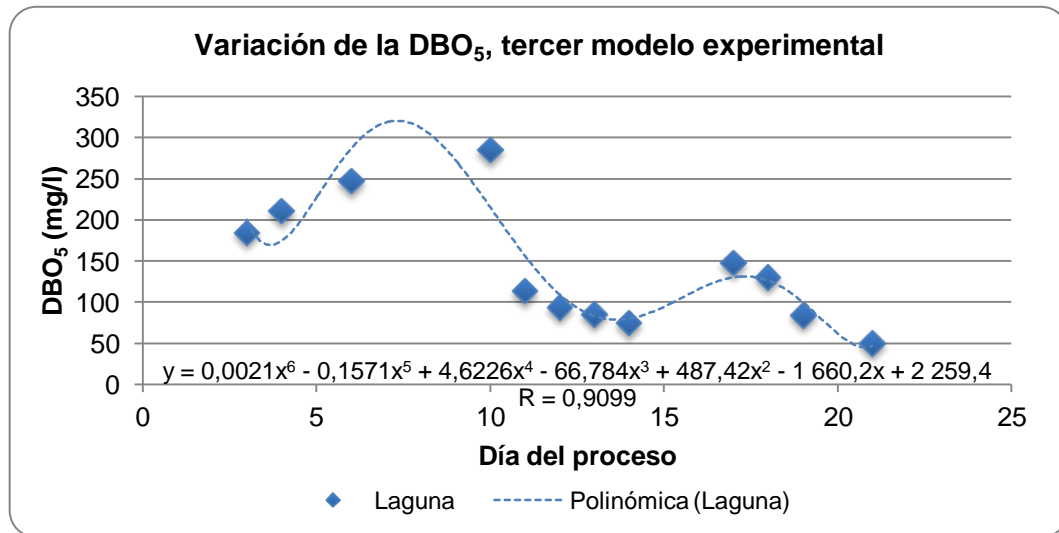
Fuente: elaboración propia.

Tabla CI. **Variación de la DBO<sub>5</sub> en el tercer modelo experimental**

Fecha de la toma	Fecha del monitoreo	Día del proceso	DBO <sub>5</sub> (mg/l)	Fecha de la toma	Fecha del monitoreo	Día del proceso	DBO <sub>5</sub> (mg/l)
26-abr	29-abr	3	185	26-abr	09-may	13	85
26-abr	30-abr	4	211	26-abr	10-may	14	75
26-abr	02-may	6	248	26-abr	13-may	17	148
26-abr	06-may	10	285	26-abr	14-may	18	130
26-abr	07-may	11	114	26-abr	15-may	19	84
26-abr	08-may	12	94	26-abr	17-may	21	50

Fuente: elaboración propia.

Figura 89. **Variación de la DBO<sub>5</sub> en el tercer modelo experimental**



Fuente: elaboración propia.

**4.4.2.3.2. Características del agua tratada, efluente del modelo a escala de planta piloto**

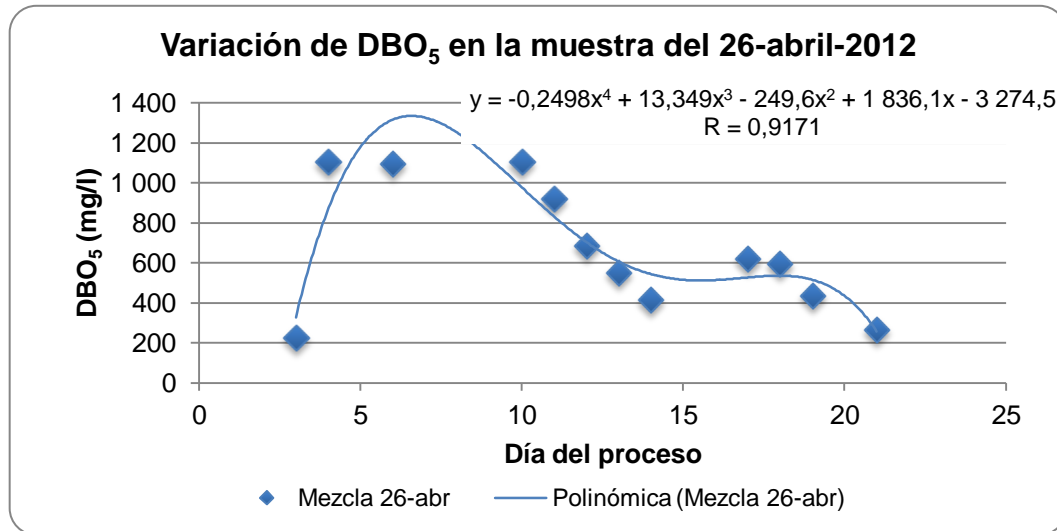
El monitoreo del oxígeno disuelto para el período de muestro correspondiente al tercer modelo experimental de tratamiento biológico es el siguiente:

Tabla CII. **Variación de la DBO<sub>5</sub> para la muestra del 26-abril-2012**

Fecha de la toma	Fecha del monitoreo	Día del proceso	DBO <sub>5</sub> (mg/l)	Fecha de la toma	Fecha del monitoreo	Día del proceso	DBO <sub>5</sub> (mg/l)
26-abr	29-abr	3	225	26-abr	09-may	13	550
26-abr	30-abr	4	1 105	26-abr	10-may	14	415
26-abr	02-may	6	1 095	26-abr	13-may	17	620
26-abr	06-may	10	1 105	26-abr	14-may	18	595
26-abr	07-may	11	920	26-abr	15-may	19	435
26-abr	08-may	12	685	26-abr	17-may	21	265

Fuente: elaboración propia.

Figura 90. **Variación de la DBO<sub>5</sub> en la muestra tomada el 26-abril-2012**



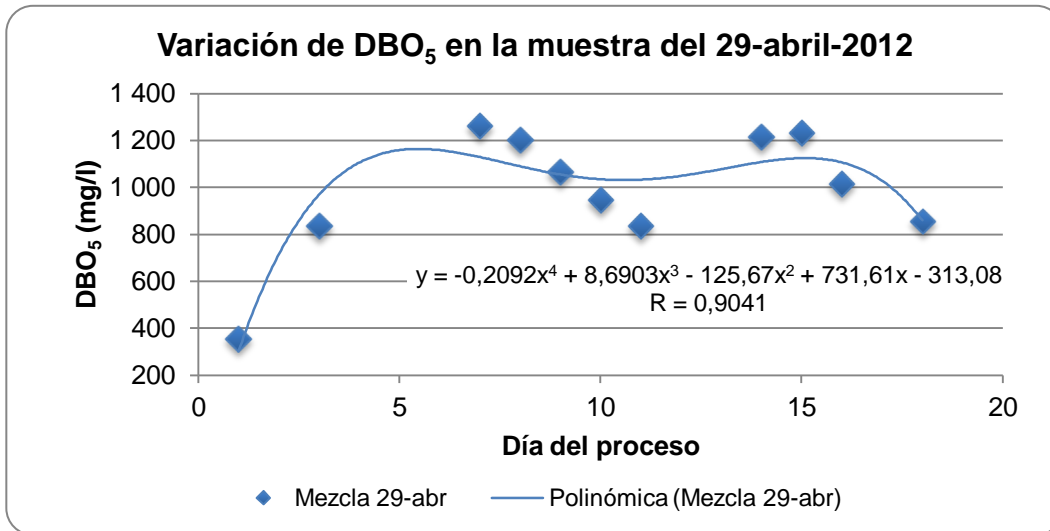
Fuente: elaboración propia.

Tabla CIII. **Variación de la DBO<sub>5</sub> para la muestra del 29-abril-2012**

Fecha de la toma	Fecha del monitoreo	Día del proceso	DBO <sub>5</sub> (mg/l)	Fecha de la toma	Fecha del monitoreo	Día del proceso	DBO <sub>5</sub> (mg/l)
29-abr	30-abr	1	355	29-abr	10-may	11	835
29-abr	02-may	3	835	29-abr	13-may	14	1 215
29-abr	06-may	7	1 260	29-abr	14-may	15	1 230
29-abr	07-may	8	1 200	29-abr	15-may	16	1 015
29-abr	08-may	9	1 065	29-abr	17-may	18	855
29-abr	09-may	10	945				

Fuente: elaboración propia.

Figura 91. Variación de la DBO<sub>5</sub> en la muestra tomada el 29-abril-2012



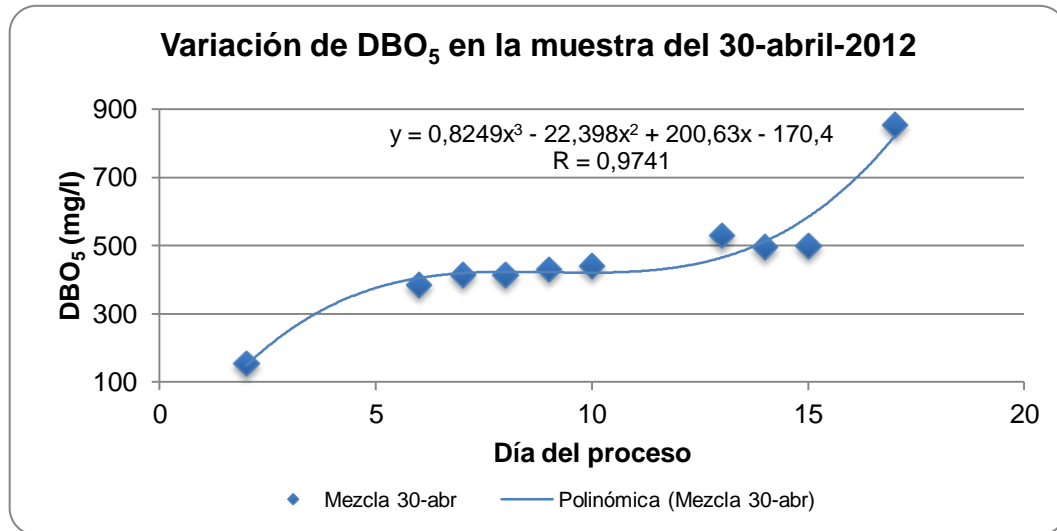
Fuente: elaboración propia.

Tabla CIV. Variación de la DBO<sub>5</sub> para la muestra del 30-abril-2012

Fecha de la toma	Fecha del monitoreo	Día del proceso	DBO <sub>5</sub> (mg/l)	Fecha de la toma	Fecha del monitoreo	Día del proceso	DBO <sub>5</sub> (mg/l)
30-abr	02-may	2	155	30-abr	10-may	10	440
30-abr	06-may	6	385	30-abr	13-may	13	530
30-abr	07-may	7	415	30-abr	14-may	14	495
30-abr	08-may	8	415	30-abr	15-may	15	500
30-abr	09-may	9	430	30-abr	17-may	17	855

Fuente: elaboración propia.

Figura 92. **Variación de la DBO<sub>5</sub> en la muestra tomada el 30-abril-2012**



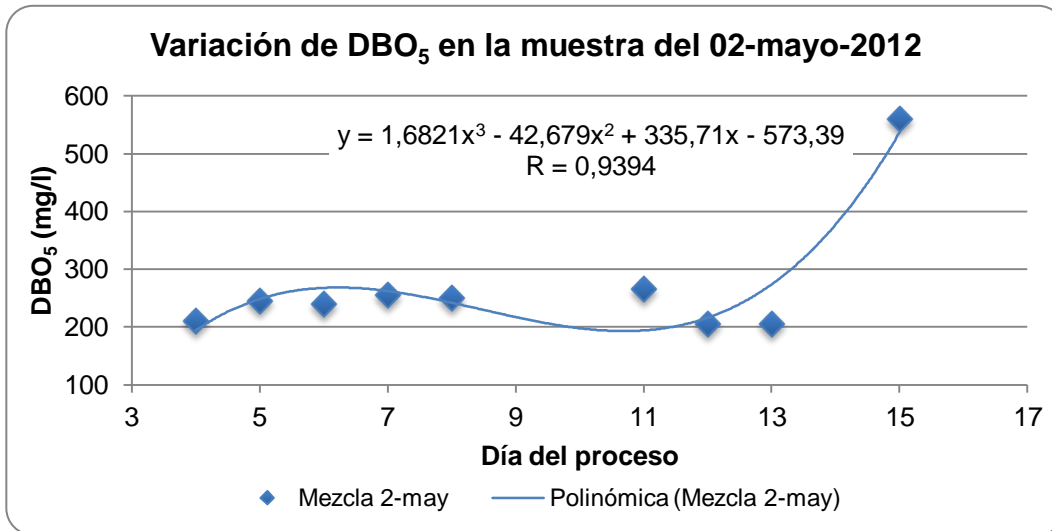
Fuente: elaboración propia.

Tabla CV. **Variación de la DBO<sub>5</sub> para la muestra del 02-mayo-2012**

Fecha de la toma	Fecha del monitoreo	Día del proceso	DBO <sub>5</sub> (mg/l)	Fecha de la toma	Fecha del monitoreo	Día del proceso	DBO <sub>5</sub> (mg/l)
02-may	06-may	4	210	02-may	13-may	11	265
02-may	07-may	5	245	02-may	14-may	12	205
02-may	08-may	6	240	02-may	15-may	13	205
02-may	09-may	7	255	02-may	17-may	15	560
02-may	10-may	8	250				

Fuente: elaboración propia.

Figura 93. **Variación de la DBO<sub>5</sub> en la muestra tomada el 02-mayo-2012**



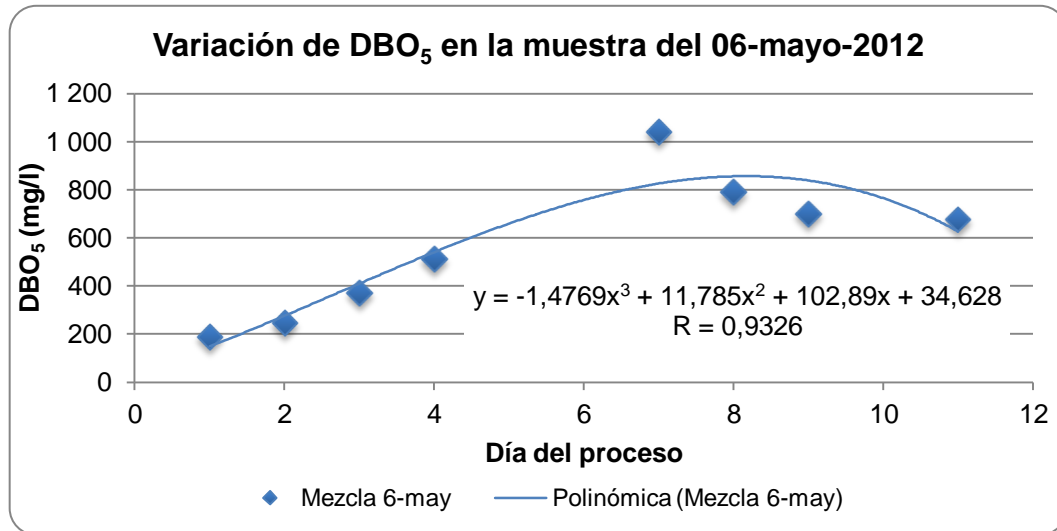
Fuente: elaboración propia.

Tabla CVI. **Variación de la DBO<sub>5</sub> para la muestra del 06-mayo-2012**

Fecha de la toma	Fecha del monitoreo	Día del proceso	DBO <sub>5</sub> (mg/l)	Fecha de la toma	Fecha del monitoreo	Día del proceso	DBO <sub>5</sub> (mg/l)
06-may	07-may	1	190	06-may	13-may	7	1 040
06-may	08-may	2	245	06-may	14-may	8	790
06-may	09-may	3	370	06-may	15-may	9	700
06-may	10-may	4	510	06-may	17-may	11	675

Fuente: elaboración propia.

Figura 94. Variación de la DBO<sub>5</sub> en la muestra tomada el 06-mayo-2012



Fuente: elaboración propia.

#### 4.4.2.3.3. Eficiencia de la unidad de tratamiento

Para el cálculo de la eficiencia de la unidad de tratamiento se considera la DBO<sub>5</sub> de cada una de las muestras de agua analizadas durante el período de muestreo, obteniéndose los siguientes resultados:



Tabla CVII. **Cálculo de la DBO<sub>5</sub> para el período de muestreo**

Valores de DBO <sub>5</sub> generados	DBO <sub>5</sub> (mg/l)	Ecuaciones
Muestra 26-abril	1 178,50	$y = -0,2498x^4 + 13,349x^3 - 249,6x^2 + 1 836,1x - 3 274,5$
Muestra 29-abril	1 158,76	$y = -0,2092x^4 + 8,6903x^3 - 125,67x^2 + 731,61x - 313,08$
Muestra 30-abril	375,91	$y = 0,8249x^3 - 22,398x^2 + 200,63x - 170,4$
Muestra 02-mayo	248,45	$y = 1,6821x^3 - 42,679x^2 + 335,71x - 573,39$
Muestra 06-mayo	659,09	$Y = -1,4769x^3 + 11,785x^2 + 102,89x + 34,628$

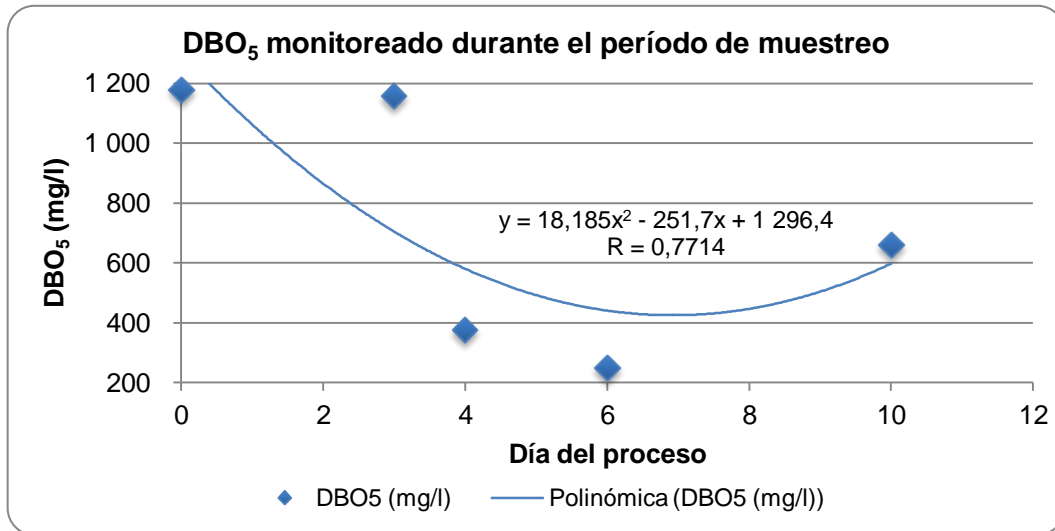
Fuente: elaboración propia.

Tabla CVIII. **Eficiencia de remoción de DBO<sub>5</sub> de la unidad de tratamiento**

Tomas de muestra	Fecha de la toma de muestra	Día del proceso	DBO <sub>5</sub> (mg/l)	DBO remanente	Eficiencia
1	26-abr-2012	0	1 178,50	100,00%	0,00%
2	29-abr-2012	3	1 158,76	98,32%	1,68%
3	30-abr-2012	4	375,91	31,90%	68,10%
4	02-may-2012	6	248,45	21,08%	78,92%
5	06-may-2012	10	659,09	55,93%	44,07%

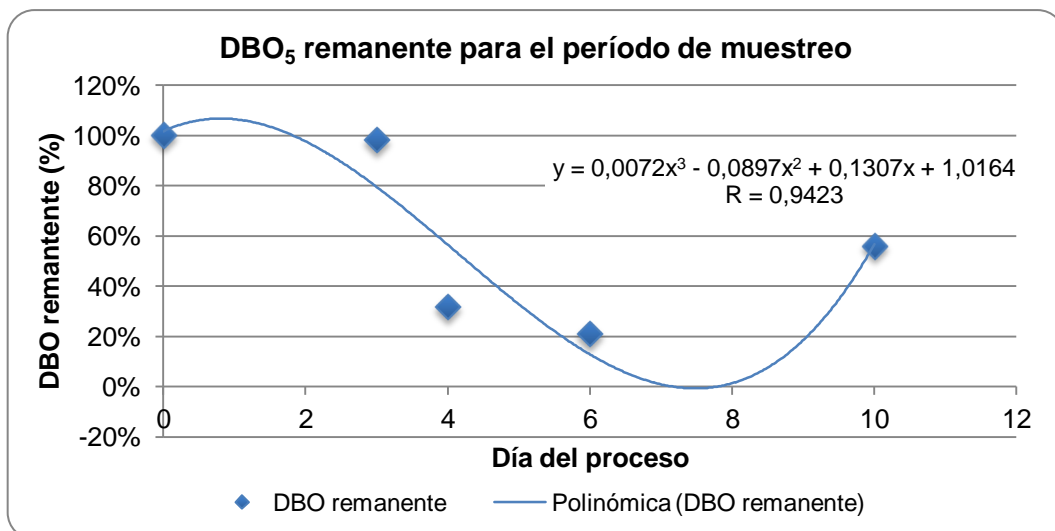
Fuente: elaboración propia.

Figura 95. **DBO<sub>5</sub> monitoreado durante el período de muestreo**



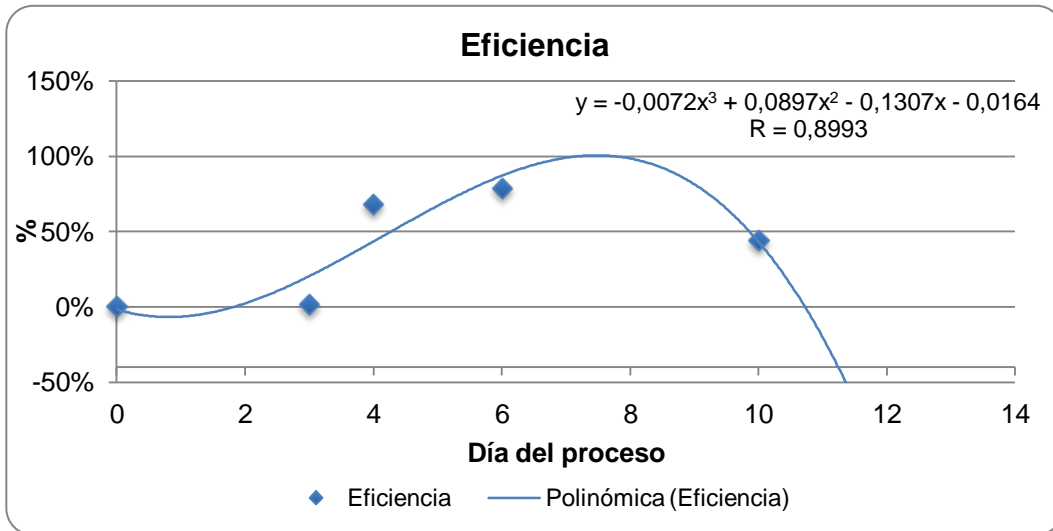
Fuente: elaboración propia.

Figura 96. **DBO<sub>5</sub> remanente para el período de muestreo**



Fuente: elaboración propia.

Figura 97. **Eficiencia de remoción de DBO<sub>5</sub> de la unidad de tratamiento**



Fuente: elaboración propia.

El tiempo requerido para alcanzar una eficiencia del 70% es el siguiente:

Tabla CIX. **Eficiencia del 70% esperada, tercer modelo experimental**

Proyección de eficiencia	Retención hidráulica requerida (día)	Retención hidráulica requerida (horas)	Eficiencia esperada
Máxima eficiencia	5,125	123,00	70,06%
Ecuación	$y = -0,0072x^3 + 0,0897x^2 - 0,1307x - 0,0164$		

Fuente: elaboración propia.

#### 4.4.2.3.4. Monitoreo de otros parámetros

El monitoreo de algunos otros parámetros durante el período de muestreo es:

Tabla CX. **Otros parámetros, tercer modelo experimental**

Característica	F e c h a			
	26-abr	29-abr	30-abr	02-may
Oxígeno disuelto (mg/l)	8,44	4,44		
Sólido disueltos totales (mg/l)	639,00	790,00	873,00	1 043,00
Conductividad eléctrica (µS/cm)	1 364,00	1 453,00	1 476,00	2 075,00
Temperatura del agua (°C)	30,8	23,60	20,20	27,70
Salinidad	0,40	0,60	0,60	0,80
Potencial de hidrógeno	7,12	8,54	8,33	8,69
Día del proceso	0	3	4	6
Eficiencia de remoción de DBO soluble (mg/l)	0,00%	1,68%	68,10%	78,92%

Fuente: elaboración propia.

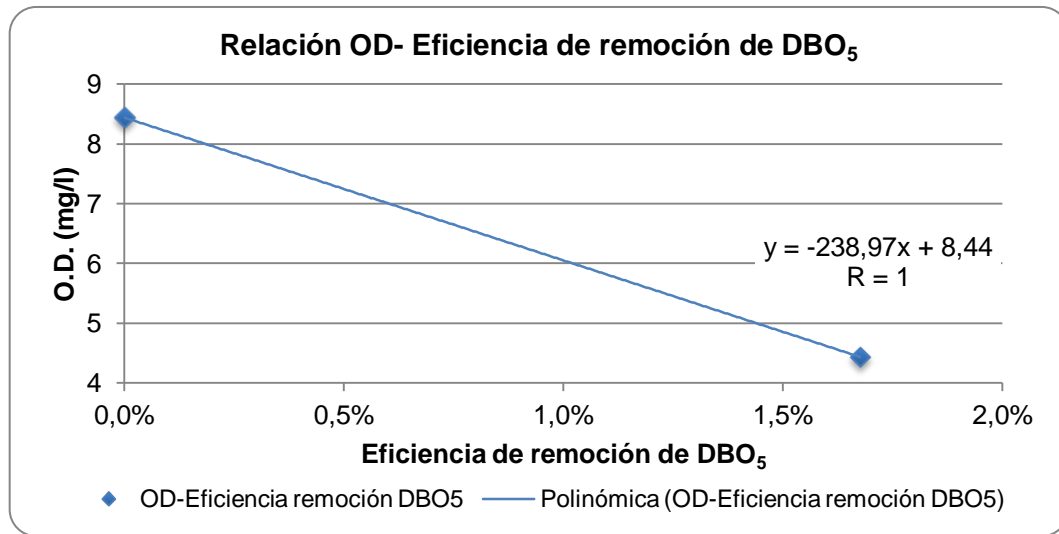
La correlación de los parámetros monitoreados con la eficiencia de remoción de DBO<sub>5</sub> de la unidad de tratamiento es la siguiente:

Tabla CXI. **Coefficientes de correlación lineal entre los parámetros monitoreados y la eficiencia de remoción de DBO<sub>5</sub> de la unidad de tratamiento**

N°	Fecha	Eficiencia de remoción del proceso (%)	OD (mg/l)	SDT (mg/l)	CE (µS/cm)	Salinidad	pH
1	26/04/2013	0,00%	8,44	639,00	1 364,00	0,40	7,12
2	29/04/2013	1,68%	4,44	790,00	1 453,00	0,57	8,54
3	30/04/2013	68,10%		873,33	1 476,00	0,60	8,33
4	02/05/2013	78,92%		1 042,67	2 075,00	0,83	8,69
Coeficiente de correlación Pearson			1,0000	0,8793	0,7275	0,8126	0,5803

Fuente: elaboración propia.

Figura 98. **Relación del oxígeno disuelto con la eficiencia de remoción de DBO<sub>5</sub> en la unidad de tratamiento**



Fuente: elaboración propia.

#### 4.4.2.4. Cuarto modelo experimental

El modelo se diseñó empleando los siguientes datos de partida:

Tabla CXII. **Datos de partida para el diseño del cuarto modelo experimental mediante el método de carga máxima por radiación solar**

MES	Insolación solar kW-hrs/m <sup>2</sup> -día	kJ/ha-día	Eficiencia de algas	CSm (kg O <sub>2</sub> / ha-día)	Área de la planta piloto (m <sup>2</sup> )	Área de la planta piloto (ha)
mayo	5,48	1,97E+08	0,03	382,13	0,6	0,00006

Continuación de la tabla CXII.

MES	Área de la planta piloto (ha)	Carga diaria (Kg de DBO /día)	Carga (mg de DBO/día)	Volumen de descarga (l)	Concentración sugerida máxima (mg DBO/litro-litro)
mayo	0,00006	0,022927818	22 927,82	14,21	1 613,75

Fuente: <http://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi?uid=0>. Consulta: 06 de mayo de 2013.

Los cálculos para la determinación de la descarga de agua miel que se aplicó al cuarto modelo experimental son los siguientes:

Tabla CXIII. **Descarga de agua miel a aplicar al cuarto modelo experimental**

DQO del agua	27 220,00	mg/l
relación DBO/DQO típico de las aguas mieles	0,68	
Valor esperado de DBO <sub>5</sub> descargado =	18 509,60	mg/l
Cantidad de litros de la descarga	1,2387	l

Fuente: elaboración propia.

**4.4.2.4.1. Monitoreo de la DBO<sub>5</sub> para los parámetros iniciales del modelo**

El monitoreo del oxígeno disuelto para el período de muestro correspondiente a los parámetros iniciales del cuarto modelo experimental de tratamiento biológico es el siguiente:

Tabla CXIV. **Monitoreo del oxígeno disuelto para cálculo de la DBO<sub>5</sub>**

Descripción de la muestra	Porcentaje de dilución de DBO	Fechas				
		07-may	08-may	09-may	10-may	13-may
Muestra 07-may	1,0%	6,69	5,99		5,41	5,40
Muestra 08-may	1,0%		6,80			5,76
Muestra 09-may	1,0%			6,67		
Muestra 10-may	1,0%				6,62	
Muestra 13-may	1,0%					7,10

Descripción de la Muestra	Porcentaje de dilución de DBO	Fechas			
		14-may	15-may	17-may	18-may
Muestra 07-may	1,0%	5,67	5,92	6,00	
Muestra 08-may	1,0%	5,70	5,70	5,31	
Muestra 09-may	1,0%	5,83	5,82	5,64	
Muestra 10-may	1,0%		6,06	5,93	
Muestra 13-may	1,0%				6,60

Fuente: elaboración propia.



#### 4.4.2.4.2. Características del agua tratada, efluente del modelo a escala de planta piloto

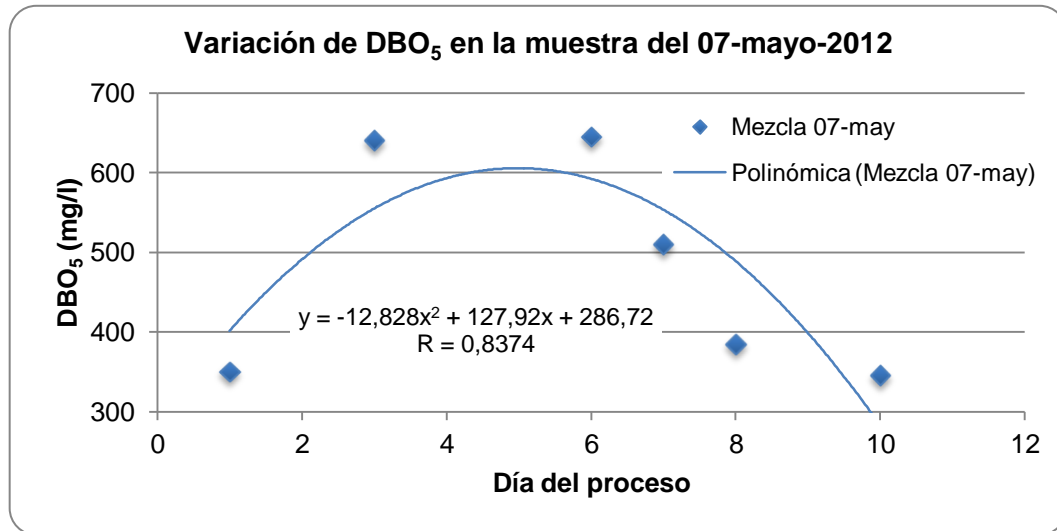
El monitoreo del oxígeno disuelto para el período de muestro correspondiente al cuarto modelo experimental de tratamiento biológico es el siguiente:

Tabla CXV. Variación de la DBO<sub>5</sub> para la muestra del 07-mayo-2012

Fecha de la toma	Fecha del monitoreo	Día del proceso	DBO <sub>5</sub> (mg/l)
07-may	08-may	1	350
07-may	10-may	3	640
07-may	13-may	6	645
07-may	14-may	7	510
07-may	15-may	8	385
07-may	17-may	10	345

Fuente: elaboración propia.

Figura 99. **Variación de la DBO<sub>5</sub> en la muestra tomada el 07-mayo-2012**



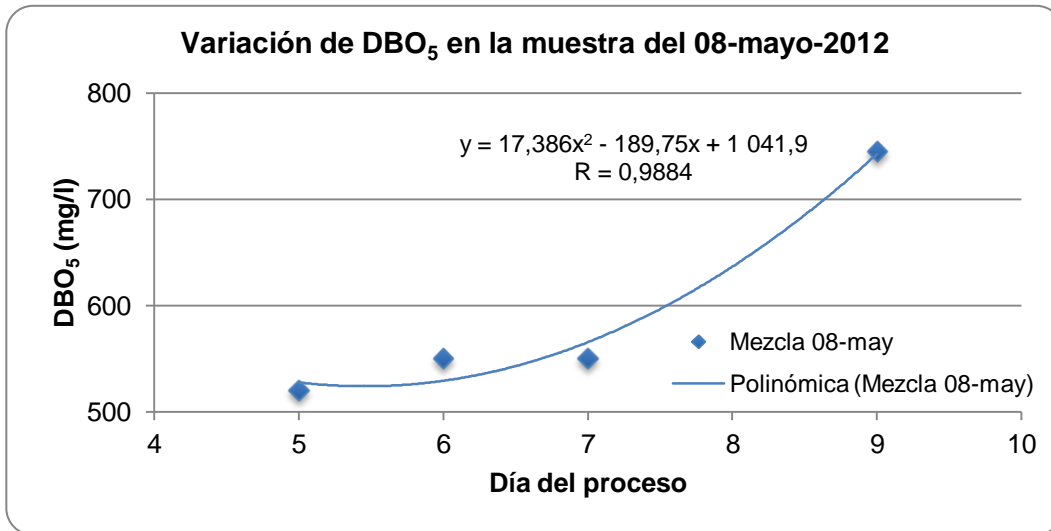
Fuente: elaboración propia.

Tabla CXVI. **Variación de la DBO<sub>5</sub> para la muestra del 08-mayo-2012**

Fecha de la toma	Fecha del monitoreo	Día del proceso	DBO <sub>5</sub> (mg/l)
08-may	13-may	5	520
08-may	14-may	6	550
08-may	15-may	7	550
08-may	17-may	9	745

Fuente: elaboración propia.

Figura 100. **Variación de la DBO<sub>5</sub> en la muestra tomada el 08-mayo-2012**



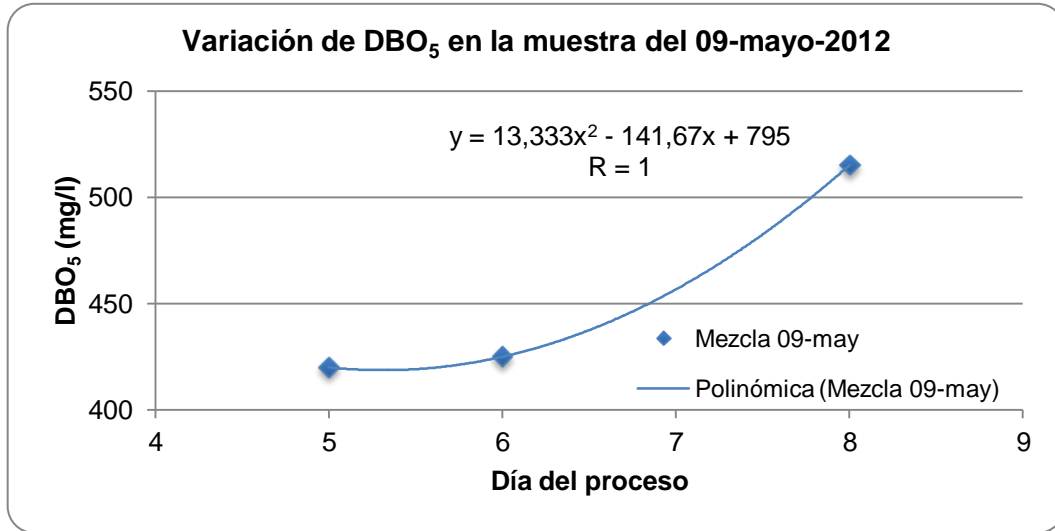
Fuente: elaboración propia.

Tabla CXVII. **Variación de la DBO<sub>5</sub> para la muestra del 09-mayo-2012**

Fecha de la toma	Fecha del monitoreo	Día del proceso	DBO <sub>5</sub> (mg/l)
09-may	14-may	5	420
09-may	15-may	6	425
09-may	17-may	8	515

Fuente: elaboración propia.

Figura 101. **Variación de la DBO<sub>5</sub> en la muestra tomada el 09-mayo-2012**



Fuente: elaboración propia.

#### 4.4.2.4.3. **Eficiencia de la unidad de tratamiento**

Para el cálculo de la eficiencia de la unidad de tratamiento se considera la DBO<sub>5</sub> de cada una de las muestras de agua analizadas durante el período de muestreo, obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla CXVIII. **Cálculo de la DBO<sub>5</sub> para el período de muestreo**

Valores de DBO generados	Día del proceso	DBO <sub>5</sub> (mg/l)	Ecuación
Muestra 07-may	5	605,62	$y = -12,828x^2 + 127,92x + 286,72$

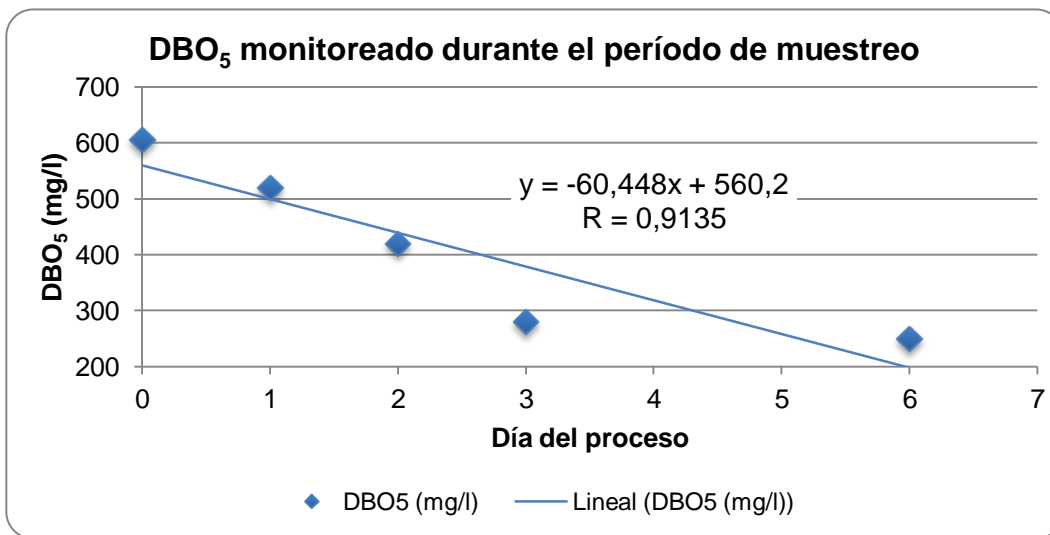
Fuente: elaboración propia.

Tabla CXIX. **Eficiencia de remoción de DBO<sub>5</sub> de la unidad de tratamiento**

Tomas de muestra	Fecha de la toma de muestra	Día del proceso	DBO <sub>5</sub> (mg/l)	DBO remanente	Eficiencia
1	07-may	0	605,62	100,00%	0,00%
2	08-may	1	520,00	85,86%	14,14%
3	09-may	2	420,00	69,35%	30,65%
4	10-may	3	280,00	46,23%	53,77%
5	13-may	6	250,00	41,28%	58,72%

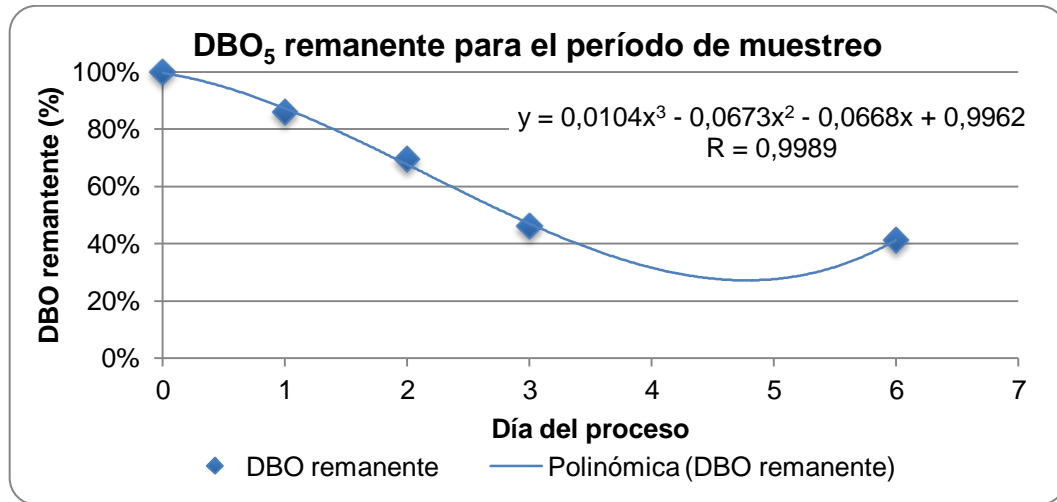
Fuente: elaboración propia.

Figura 102. **DBO<sub>5</sub> monitoreado durante el período de muestreo**



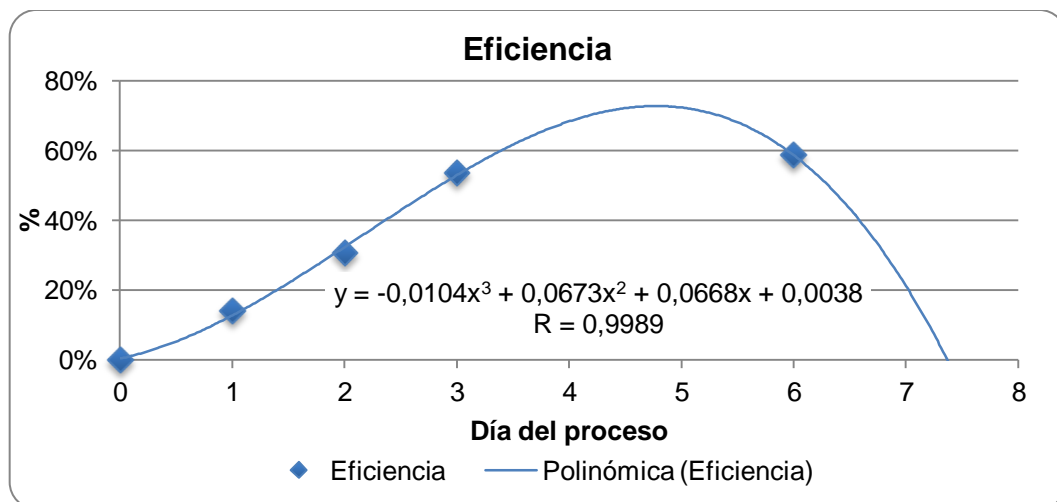
Fuente: elaboración propia.

Figura 103. **DBO<sub>5</sub> remanente para el período de muestreo**



Fuente: elaboración propia.

Figura 104. **Eficiencia de remoción de DBO<sub>5</sub> de la unidad de tratamiento**



Fuente: elaboración propia.

El tiempo requerido para alcanzar una eficiencia del 70 % es el siguiente:

Tabla CXX. **Eficiencia del 70 % esperada, cuarto modelo experimental**

Proyección de eficiencia	Retención hidráulica requerida (días)	Retención hidráulica requerida (horas)	Eficiencia esperada
Eficiencia del 70%	4,19	100,56	70,03%
Ecuación:	$y = -0,0032x^3 - 0,0002x^2 + 0,221x + 0,0066$		

Fuente: elaboración propia.

#### 4.4.2.4.4. Monitoreo de otros parámetros

El monitoreo de algunos otros parámetros en el período de muestreo es:

Tabla CXXI. **Otros parámetros, cuarto modelo experimental**

Característica	Fecha			
	07-may	08-may	10-may	13-may
Oxígeno disuelto (mg/l)		4,65	14,55	9,32
Sólido disueltos totales (mg/l)	631,00	654,33	775,67	807,33
Conductividad eléctrica (µS/cm)	1 336,00	1 414,33	1 668,00	1 445,33
Temperatura del agua (°C)	30,57	31,57	31,63	22,73
Salinidad	0,43	0,43	0,53	0,60
Potencial de hidrógeno	7,19	8,57	8,81	8,91
Día del proceso	0	1	3	6
Eficiencia de remoción de DBO soluble (mg/l)	0,00%	14,14%	53,77%	58,72%

Fuente: elaboración propia.

La correlación de los parámetros monitoreados con la eficiencia de remoción de DBO<sub>5</sub> de la unidad de tratamiento es la siguiente:

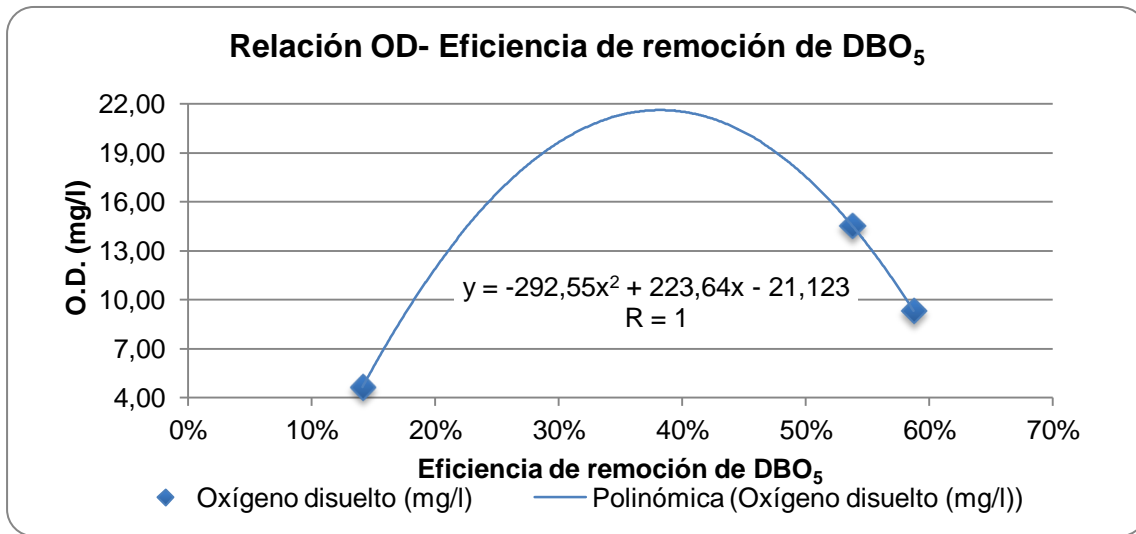
**Tabla CXXII. Coeficientes de correlación lineal entre los parámetros monitoreados y la eficiencia de remoción de DBO<sub>5</sub> de la unidad de tratamiento**

N°	Fecha	Eficiencia de remoción del proceso (%)	OD (mg/l)	SDT (mg/l)	CE (μS/cm)	Salinidad	pH
1	07/05/2013	0,00%		631,00	1 336	0,4	7,19
2	08/05/2013	24,80%	4,65	654,33	1 414	0,4	8,57
3	10/05/2013	59,51%	14,55	775,67	1 668	0,5	8,81
4	13/05/2013	63,84%	9,32	807,33	1 445	0,6	8,91
Coeficiente de correlación Pearson			0,7918	0,9696	0,7301	0,9063	0,9044

Fuente: elaboración propia.



Figura 105. **Relación del oxígeno disuelto con la eficiencia de remoción de DBO<sub>5</sub> en la unidad de tratamiento**



Fuente: elaboración propia.

#### 4.4.2.5. Quinto modelo experimental

El modelo se diseñó empleando los siguientes datos de partida:

Tabla CXXIII. **Datos de partida para el diseño del quinto modelo experimental mediante el método de carga máxima por radiación solar**

MES	Insolación solar kW-hrs/m <sup>2</sup> -día	kJ/ha-día	Eficiencia de algas	CSm (kg O <sub>2</sub> / ha-día)	Área de la planta piloto (m <sup>2</sup> )	Área de la planta piloto (ha)
mayo	5,48	1,97E+08	0,03	382,13	0,6	0,00006

Continuación de la tabla CXXIII.

MES	Área de la planta piloto (ha)	Carga diaria (kg de DBO /día)	Carga (mg de DBO/día)	Volumen de descarga (l)	Concentración sugerida máxima (mg DBO/litro-litro)
mayo	0,00006	0,022927818	22 927,82	14,21	1 613,75

Fuente: <http://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi?uid=0>. Consulta: 06 de mayo de 2013.

Los cálculos para la determinación de la descarga de agua miel que se aplicó al quinto modelo experimental son los siguientes:

Tabla CXXIV. **Descarga de agua miel a aplicar al quinto modelo experimental**

DQO del agua	27 220,00	mg/l
relación DBO/DQO típico de las aguas mieles	0,68	
Valor esperado de DBO <sub>5</sub> descargado =	18 509,60	mg/l
Cantidad de litros de la descarga	0,28	l

Fuente: elaboración propia.

**4.4.2.5.1. Monitoreo de la DBO<sub>5</sub> para los parámetros iniciales del modelo**

El monitoreo del oxígeno disuelto para el período de muestro correspondiente a los parámetros iniciales del quinto modelo experimental de tratamiento biológico es el siguiente:

Tabla CXXV. **Monitoreo del oxígeno disuelto para cálculo de la DBO<sub>5</sub>**

Descripción de la muestra	Porcentaje de dilución de DBO	Fechas				
		07-may	08-may	09-may	10-may	13-may
Muestra 07-may	1,0%	6,74	6,07		5,10	4,71
Muestra 08-may	1,0%		6,79			5,29
Muestra 09-may	1,0%			6,67		
Muestra 10-may	1,0%				6,59	
Muestra 13-may	1,0%					7,08

Descripción de la Muestra	Porcentaje de Dilución de DBO	Fechas			
		14-may	15-may	17-may	18-may
Muestra 07-may	1,0%	4,73	4,87	4,83	
Muestra 08-may	1,0%	5,19	5,21	5,08	
Muestra 09-may	1,0%	5,25	5,35	5,32	
Muestra 10-may	1,0%		5,38	5,13	
Muestra 13-may	1,0%				6,07

Fuente: elaboración propia.

#### 4.4.2.5.2. Características del agua tratada, efluente del modelo a escala de planta piloto

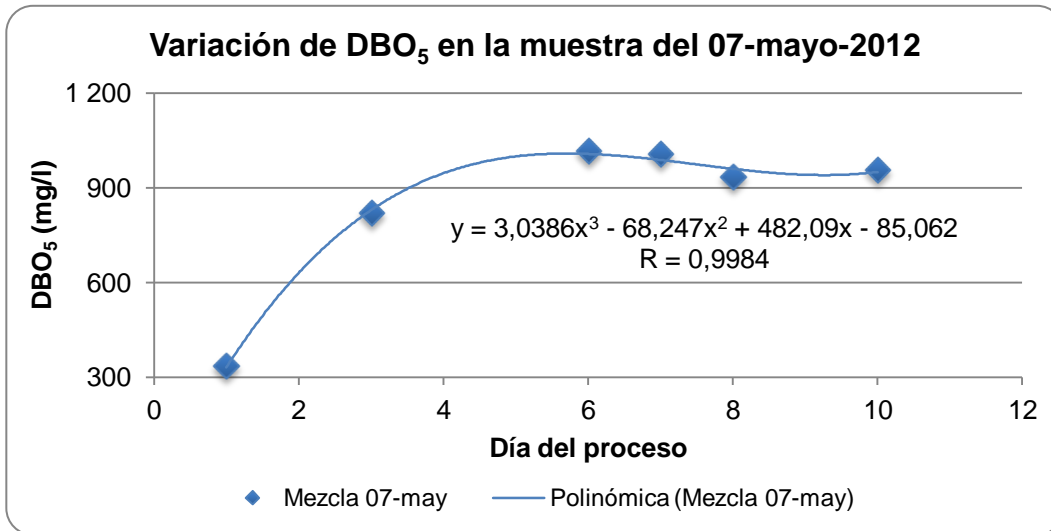
El monitoreo del oxígeno disuelto para el período de muestro correspondiente al quinto modelo experimental de tratamiento biológico es el siguiente:

Tabla CXXVI. **Variación de la DBO<sub>5</sub> para la muestra del 07-mayo-2012**

Fecha de la toma	Fecha del monitoreo	Día del proceso	DBO <sub>5</sub> (mg/l)
07-may	08-may	1	335
07-may	10-may	3	820
07-may	13-may	6	1 015
07-may	14-may	7	1 005
07-may	15-may	8	935
07-may	17-may	10	955

Fuente: elaboración propia.

Figura 106. **Variación de la DBO<sub>5</sub> en la muestra tomada el 07-mayo-2012**



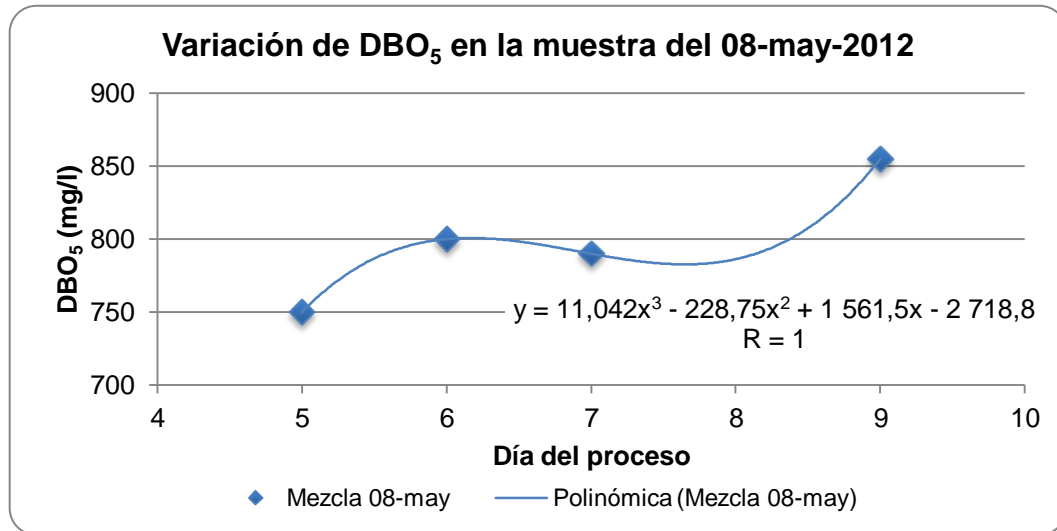
Fuente: elaboración propia.

Tabla CXXVII. **Variación de la DBO<sub>5</sub> para la muestra del 08-mayo-2012**

Fecha de la toma	Fecha del monitoreo	Día del proceso	DBO <sub>5</sub> (mg/l)
08-may	13-may	5	750
08-may	14-may	6	800
08-may	15-may	7	790
08-may	17-may	9	855

Fuente: elaboración propia.

Figura 107. **Variación de la DBO<sub>5</sub> en la muestra tomada el 08-mayo-2012**



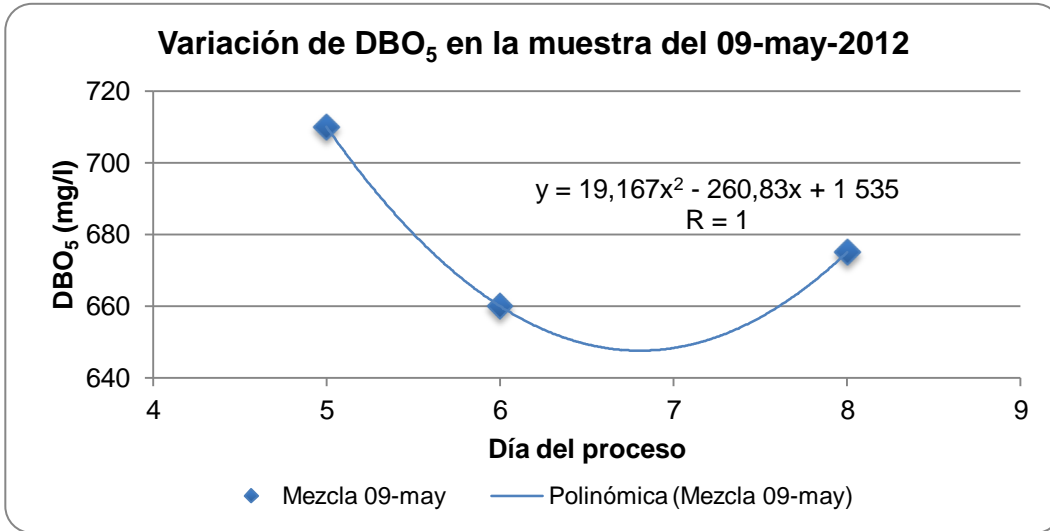
Fuente: elaboración propia.

Tabla CXXVIII. **Variación de la DBO<sub>5</sub> para la muestra del 09-mayo-2012**

Fecha de la toma	Fecha del monitoreo	Día del proceso	DBO <sub>5</sub> (mg/l)
09-may	14-may	5	710
09-may	15-may	6	660
09-may	17-may	8	675

Fuente: elaboración propia.

Figura 108. Variación de la DBO<sub>5</sub> en la muestra tomada el 09-mayo-2012



Fuente: elaboración propia.

#### 4.4.2.5.3. Eficiencia de la unidad de tratamiento

Para el cálculo de la eficiencia de la unidad de tratamiento se considera la DBO<sub>5</sub> de cada una de las muestras de agua analizadas durante el período de muestreo, obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla CXXIX. Cálculo de la DBO<sub>5</sub> para el período de muestreo

Valores de DBO generados	Día del proceso	DBO <sub>5</sub> (mg/l)	Ecuación
Muestra 07-may	5	943,42	$y = 3,0386x^3 - 68,247x^2 + 482,09x - 85,062$

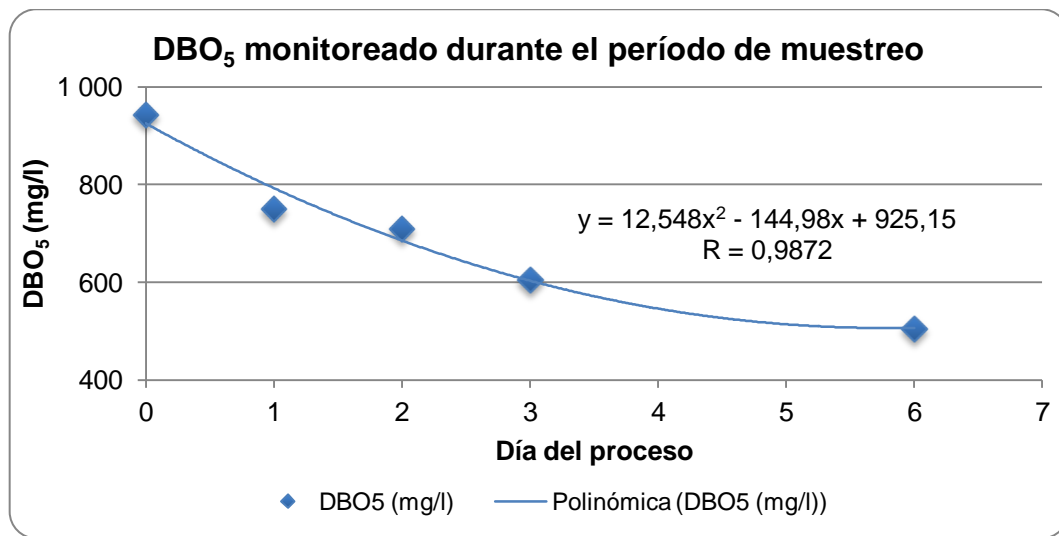
Fuente: elaboración propia.

Tabla CXXX. **Eficiencia de remoción de DBO<sub>5</sub> de la unidad de tratamiento**

Tomas de muestra	Fecha de la toma de muestra	Día del proceso	DBO <sub>5</sub> (mg/l)	DBO remanente	Eficiencia
1	07-may	0	943,42	100,00%	0,00%
2	08-may	1	750,00	79,50%	20,50%
3	09-may	2	710,00	75,26%	24,74%
4	10-may	3	605,00	64,13%	35,87%
5	13-may	6	505,00	53,53%	46,47%

Fuente: elaboración propia.

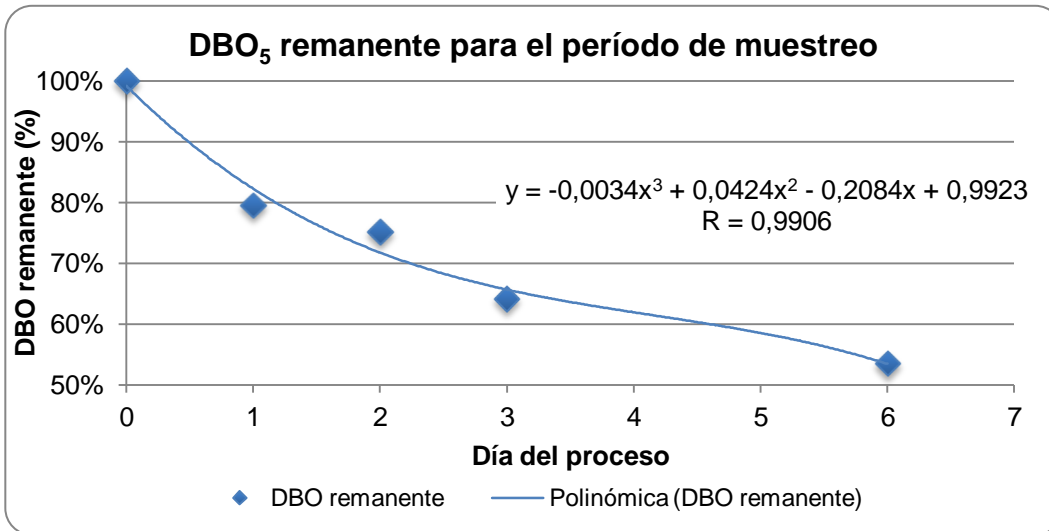
Figura 109. **DBO<sub>5</sub> monitoreado durante el período de muestreo**



Fuente: elaboración propia.

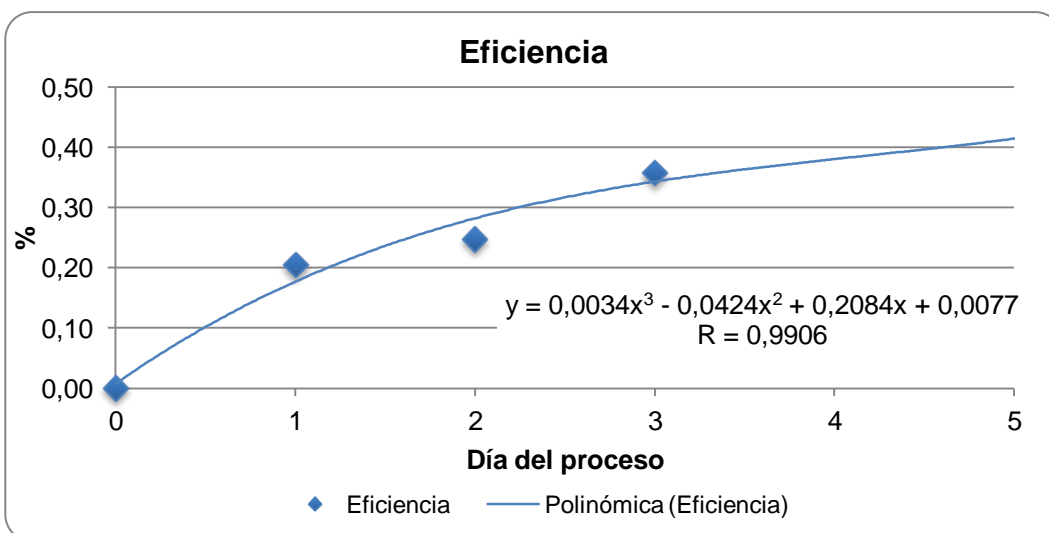


Figura 110. **DBO<sub>5</sub> remanente para el período de muestreo**



Fuente: elaboración propia.

Figura 111. **Eficiencia de remoción de DBO<sub>5</sub> de la unidad de tratamiento**



Fuente: elaboración propia.

El tiempo requerido para alcanzar una eficiencia del 70% es el siguiente:

Tabla CXXXI. **Eficiencia del 70 % esperada, quinto modelo experimental**

Proyección de eficiencia	Retención hidráulica requerida (días)	Retención hidráulica requerida (horas)	Eficiencia esperada
Eficiencia del 70%	7,99	191,76	70,03%
Ecuación:	$y = 0,0034x^3 - 0,0424x^2 + 0,2084x + 0,0077$		

Fuente: elaboración propia.

#### 4.4.2.5.4. Monitoreo de otros parámetros

El monitoreo de algunos otros parámetros en el período de muestreo es:

Tabla CXXXII. **Otros parámetros, quinto modelo experimental**

Característica	Fecha				
	07-may	08-may	09-may	10-may	13-may
Oxígeno disuelto (mg/l)		6,94	18,08	20,96	12,75
Sólido disueltos totales (mg/l)	631,00	716,00	776,00	884,00	912,00
Conductividad eléctrica (µS/cm)	1 529,00	1 672,00	1 825,00	1 995,00	1 663,00
Temperatura del agua (°C)	32,90	35,70	36,20	33,90	31,10
Salinidad	0,50	0,50	0,60	0,70	0,70
Potencial de hidrógeno	7,34	8,89	9,08	8,91	8,51
Día del proceso	0	1	2	3	6
Eficiencia de remoción de DBO soluble (mg/l)	0,00%	20,50%	24,74%	35,87%	46,47%

Fuente: elaboración propia.

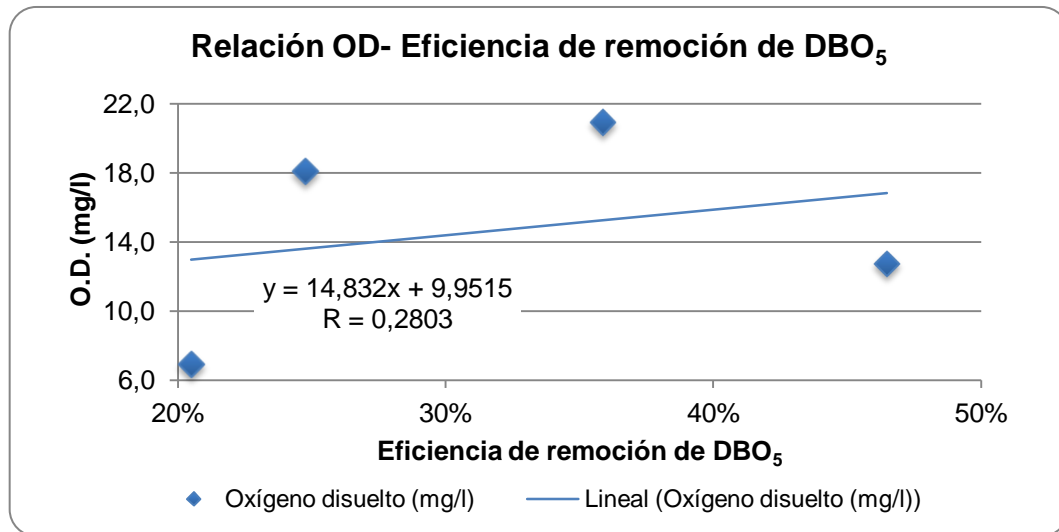
La correlación de los parámetros monitoreados con la eficiencia de remoción de DBO<sub>5</sub> de la unidad de tratamiento es la siguiente:

**Tabla CXXXIII. Coeficientes de correlación lineal entre los parámetros monitoreados y la eficiencia de remoción de DBO<sub>5</sub> de la unidad de tratamiento**

N°	Fecha	Eficiencia de remoción del proceso (%)	OD (mg/l)	SDT (mg/l)	CE (μS/cm)	Salinidad	pH
1	07-may	0,00%		631,00	1 529,00	0,50	7,34
2	08-may	20,50%	6,94	716,00	1 672,00	0,50	8,89
3	09-may	24,74%	18,08	776,00	1 825,00	0,60	9,08
4	10-may	35,87%	20,96	884,00	1 995,00	0,70	8,91
5	13-may	46,47%	12,75	912,00	1 663,00	0,70	8,51
Coeficiente de correlación Pearson			0,2803	0,9762	0,5359	0,8841	0,6412

Fuente: elaboración propia.

Figura 112. **Relación del oxígeno disuelto con la eficiencia de remoción de DBO<sub>5</sub> en la unidad de tratamiento**



Fuente: elaboración propia.



## 5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La discusión de los resultados obtenidos mediante la presente investigación es:

### 5.1. Caracterización del agua para el lavado y despulpado del café

Desde la tabla XX hasta la tabla XXIV y de la figura 19 a la figura 34, se muestran los resultados obtenidos para las características físicas, químicas y bacteriológicas del agua para el lavado y despulpado del café; a partir de los análisis realizados y tomando como referente los criterios de calidad detallados en la tabla CXXXIV, se determina que las características del agua empleada actualmente en el proceso no constituyen un factor que impida continuar con el aprovechamiento de la fuente para el procesamiento del fruto del café.

Tabla CXXXIV. **Criterios de calidad para abastecimiento industrial y generación de energía**

N°	Parámetro	Valor	Unidad	Observaciones
1	Materiales flotantes	Visualmente ausentes	No aplica	No aplica
2	Aspecto y olor	No objetables	No aplica	No aplica
3	Fenoles	1,0	mg/l	Valor máximo
4	Oxígeno disuelto	2,0	mg/l	Valor mínimo

Fuente: SARAVIDA, Pedro. Contaminación del agua.

La tabla XX muestra los resultados obtenidos para el oxígeno disuelto y el potencial de hidrógeno del agua para el lavado y despulpado del café, cuyos valores están comprendidos entre 5,53 mg/l y 7,81 mg/l, para el oxígeno disuelto, y entre 7,00 y 7,56 unidades de pH, para el potencial de hidrógeno; dichos valores evidencian que el agua para el lavado y despulpado del café posee las características necesarias para favorecer un proceso de fermentación óptimo del fruto del café.

La tabla XXII muestra que existen concentraciones elevadas de nitrato, hierro y manganeso en el agua para el lavado y despulpado del café. Las concentraciones elevadas de nitrato (de 0,18 a 3,0 mg/l) en el agua analizada constituyen un indicador “poco confiable” de contaminación de origen orgánico, sin embargo, este parámetro no tiene relevancia aparente en el procesamiento industrial del fruto del café; mientras que, las concentraciones elevadas de hierro y manganeso (mayores de 0,3 y 0,1 mg/l respectivamente) sí poseen relevancia para dicho procesamiento industrial debido a las dificultades que pueden surgir en el sistema y equipos de distribución internos debido a incrustaciones en las tuberías y al crecimiento de las bacterias del hierro como *Crenothrix*, *Leptothrix*, *Galionella*, y del manganeso como *Sphaerotilus* y *Leptothrix*.

La tabla XXIV muestra los resultados de los análisis bacteriológicos realizados a las muestras de agua para el lavado y despulpado del café; dichos resultados, aunados a las concentraciones elevadas de nitrato, evidencian que la fuente ha sufrido contaminación fecal anteriormente; no obstante, dicha contaminación no pone en riesgo el aprovechamiento de la fuente debido a que su presencia no compromete ninguna de las etapas del procesamiento industrial del fruto del café ni la calidad del producto final obtenido.

## **5.2. Caracterización del agua residual generada durante el lavado y despulpado del café**

Desde la tabla XXV hasta la tabla XXXII y de la figura 35 a la figura 47, se muestran los resultados obtenidos para las características físicas y químicas relevantes (para el presente estudio especial) del agua miel generada durante el lavado y despulpado del café.

La tabla XXV muestra que el rango de contenidos de oxígeno disuelto del agua miel generada durante el lavado y despulpado del café varía desde 0,12 mg/l hasta 0,62 mg/l para una temperatura promedio de 25 °C, lo cual evidencia una disminución considerable de la calidad del agua empleada para el lavado y despulpado del café en términos de una pérdida promedio de 6 mg/l de oxígeno disuelto, además de propiciar las condiciones anaeróbicas en el efluente; adicionalmente, se observa una acidificación severa del agua medida en términos del potencial de hidrógeno, el cual sufre una disminución promedio de 2,93 unidades de pH.

En la tabla XXVI, la tabla XXVII y la tabla XXVIII se muestran los resultados obtenidos para la DQO, la DBO<sub>5</sub> y el índice de biodegradabilidad del agua miel generada durante el lavado y despulpado del café, los cuales evidencian un contenido promedio de 37 250 mg/l de DQO, 27 773 mg/l de DBO<sub>5</sub> y un índice de biodegradabilidad promedio de 0,68; valores que indican que el agua analizada posee una considerable carga contaminante de origen orgánico (medida en función de la DQO y DBO<sub>5</sub>) e indica, en función de su biodegradabilidad, su factibilidad de tratamiento a través de la implementación de procesos biológicos unitarios.



La tabla XXIX muestra los resultados obtenidos para los contenidos de sólidos sedimentables y suspendidos; para los cuales se obtuvo un valor promedio de 37 cm<sup>3</sup>/l/h para el contenido de sólidos sedimentables y un valor promedio de 5 423 mg/l para el contenido de sólidos suspendidos.

La tabla XXX muestra los resultados obtenidos para los contenidos de sólidos totales, fijos y volátiles del agua miel generada durante el lavado y despulpado del café, los cuales indican que el agua analizada tiene un alto contenido de materia de origen orgánico (medido como contenido de sólidos volátiles).

La tabla XXXII muestra los resultados obtenidos para los nutrientes del agua miel generada durante el lavado y despulpado del café, de los cuales se determina que los contenidos promedio de nutrientes son 4 585 mg/l de NO<sub>3</sub>, 30 mg/l de NO<sub>2</sub>, 200 mg/l de NH<sub>3</sub> y 252 mg/l de PO<sub>4</sub>, valores que representan un incremento promedio de 125,12% en relación al contenido global de nitrógeno inorgánico y de un 418,17% en relación al contenido global de ortofosfatos.

### **5.3. Valoraciones sobre el tratamiento actual**

Desde la tabla XLIII hasta la tabla XLVI y de la figura 60 a la figura 63, se muestran los resultados obtenidos para la comparación de las características del agua miel generada durante el lavado y despulpado del café con las características del efluente del tratamiento actual (agua miel con hidróxido de calcio).

De la tabla XLIII y la figura 60 se determina que el valor remanente promedio para los sólidos suspendidos en el efluente del tratamiento actual es del 18,40%.

De la tabla XLIV y la figura 61 se determina que el incremento en el potencial de hidrógeno obtenido mediante la implementación del tratamiento actual es igual a un valor promedio de 1,23 unidades de pH, a partir de un valor inicial promedio de 4,35 unidades de pH hasta obtener un valor final promedio de 5,58 unidades de pH en el efluente,

De la tabla XLV y de la figura 62 se determina que el remanente promedio de DBO<sub>5</sub> para el efluente del tratamiento actual es igual a 49,81%, el cual equivale a una eficiencia de remoción del 50,19% en términos de DBO<sub>5</sub> soluble.

De la tabla XLVI y la figura 63 se determina que el remanente promedio de DQO para el efluente del tratamiento actual es igual a 58,75%, el cual equivale a una eficiencia de remoción del 41,25% en términos de DQO.

#### **5.4. Análisis estadístico de los datos de producción**

Desde la tabla XLVIII hasta la tabla LII y de la figura 64 a la figura 65, se muestran los datos relacionados con la producción de la cosecha 2012 – 2013 del beneficio húmedo tecnificado de la cooperativa nuevo sendero, destacándose los siguientes datos: un volumen de producción total de fruto procesado igual a 40 449,08 quintales, un volumen de café pergamino seco procesado igual a 8 515,60 quintales (considerando un factor de equivalencia entre fruto y pergamino igual a 4,75), una producción máxima diaria de 998,26 quintales de fruto, una producción mínima diaria de 2,77 quintales de fruto, una producción media de 306,43 quintales de fruto, con una mediana de 264,60 quintales de fruto y una desviación estándar de 256,46 quintales de fruto.

El 80% del tiempo durante el período de cosecha se procesó un máximo aproximado de 600,05 quintales de fruto, lo cual corresponde a un consumo de agua aproximado de 23 metros cúbicos.

## **5.5. Propuestas de tratamiento evaluadas**

La discusión de resultados de las propuestas de tratamiento evaluadas es:

### **5.5.1. Ajuste del potencial de hidrógeno mediante un modelo de lecho de contacto de roca caliza**

Los resultados de las evaluaciones del modelo de lecho de contacto de roca caliza son:

#### **5.5.1.1. Primer modelo experimental de ajuste de pH**

En la tabla LIII, se muestran los datos relacionados con el desarrollo del primer modelo experimental de ajuste de potencial de hidrógeno, a escala de laboratorio, en el cual se observó un incremento en un rango comprendido entre 2,30 y 2,60 unidades de pH en el efluente del modelo, lo que resultó en un potencial de hidrógeno final en un rango comprendido entre 7,13 y 7,43 unidades de pH.

#### **5.5.1.2. Segundo modelo experimental de ajuste de pH**

Desde la tabla LIV hasta la tabla LVI, se muestran los datos relacionados con el desarrollo del segundo modelo experimental de ajuste de potencial de hidrógeno, a escala de laboratorio, en el cual se observó un incremento en un rango comprendido entre 0,95 y 1,32 unidades de pH en el efluente del modelo, lo que resultó en un potencial de hidrógeno final en un rango comprendido entre 5,88 y 6,25 unidades de pH para una carga hidráulica comprendida en un rango desde 57,41 m/d hasta 160,83 m/d.

#### **5.5.1.3. Tercer modelo experimental de ajuste de pH**

Desde la tabla LVII hasta la tabla LXII, se muestran los datos relacionados con el desarrollo del tercer modelo experimental de ajuste de potencial de hidrógeno, a escala de laboratorio, en el cual se observó un incremento en un rango comprendido entre 0,29 y 0,65 unidades de pH en el efluente del modelo, lo que resultó en un potencial de hidrógeno final en un rango comprendido entre 5,76 y 6,12 unidades de pH para una carga hidráulica comprendida en un rango desde 6,07 m/d hasta 107,94 m/d.

#### **5.5.1.4. Cuarto modelo experimental de ajuste de pH**

Desde la tabla LXIII hasta la tabla LXVIII, se muestran los datos relacionados con el desarrollo del cuarto modelo experimental de ajuste de potencial de hidrógeno, a escala de laboratorio, en el cual se observó un incremento en un rango comprendido entre 0,90 y 1,30 unidades de pH en el

efluente del modelo, lo que resultó en un potencial de hidrógeno final en un rango comprendido entre 5,86 y 6,26 unidades de pH para una carga hidráulica comprendida en un rango desde 1,94 m/d hasta 106,24 m/d.

### 5.5.1.5. Resumen de resultados obtenidos para todos los modelos experimentales de ajuste de pH

El resumen de los resultados obtenidos en función de la variación del potencial de hidrógeno para todos los modelos experimentales de ajuste de pH es el siguiente:

Tabla CXXXV. **Resumen de resultados de los modelos experimentales**

N° de modelo	pH inicial	Agua del efluente de los modelos experimentales					
		P # 1	P # 2	P # 3	P # 4	P # 5	pH promedio
1	4,83	7,13	7,43				7,28
2	4,93	5,88	6,25	6,18			6,10
3	5,47	5,86	6,00	5,76	6,12	6,11	5,97
4	4,96	5,86	6,26	6,23	6,05	6,03	6,09

Fuente: elaboración propia.

Desde la tabla XV hasta la tabla XVIII y de la figura 16 a la figura 18, se muestran los datos relacionados con el ajuste del potencial de hidrógeno, la carga hidráulica en la columna de ajuste de pH y la altura del lecho de roca caliza; se determinó que el máximo diferencial de potencial de hidrógeno obtenido de forma instantánea es igual a 1,32 unidades de pH y corresponde a una altura de medio igual a 1,00 m y a una carga hidráulica admisible de 57,41

m/día, mientras que, el mínimo diferencial de potencial de hidrógeno obtenido de forma instantánea es igual a 0,29 unidades de pH y corresponde a una altura de medio igual a 1,00 m y a una carga hidráulica admisible de 107,94 m/día.

De la tabla XV se observa que el valor promedio del potencial de hidrógeno obtenido es igual a 6,14 unidades de pH, reportándose un pH de 7,43 como valor máximo y un pH de 5,76 como valor mínimo.

De la figura 16 a la figura 18 se muestra la línea de tendencia que mejor se ajusta al comportamiento de los datos de potencial de hidrógeno respecto de la carga hidráulica para cada altura de lecho; de estas figuras, se determinó que, para una altura de lecho igual a 1,50 metros se obtiene un coeficiente de correlación [R] de 0,7928, mientras que, para una altura de lecho igual a 1,00 metro, se obtiene un coeficiente de correlación [R] de 0,6716; adicionalmente se observa que, para todas las alturas de lecho de roca caliza, el incremento de la carga hidráulica ocasiona una disminución en el diferencial de ajuste instantáneo del potencial de hidrógeno obtenido.

### **5.5.2. Tratamiento biológico en un modelo de laguna facultativa a escala de laboratorio**

Los resultados de las evaluaciones del modelo de laguna facultativa a escala de laboratorio son:

#### **5.5.2.1. Primer modelo experimental**

Desde la tabla LXIX hasta la tabla LXXXII y de la figura 66 a la figura 75, se muestran los datos relacionados con el desarrollo del primer modelo experimental de laguna facultativa a escala de laboratorio.

En la tabla LXXIX se muestran los resultados de la eficiencia de remoción de  $\text{DBO}_5$  de la unidad de tratamiento, de dichos resultados se puede destacar que la mayor eficiencia de remoción de  $\text{DBO}_5$  obtenida es igual a 47,17 % que corresponde al sexto día de monitoreo; sin embargo, al séptimo día de monitoreo se observa una disminución considerable de la eficiencia de la unidad de tratamiento, obteniéndose un resultado de 9,69 %.

#### **5.5.2.2. Segundo modelo experimental**

Desde la tabla LXXXIII hasta la tabla XCVII y de la figura 76 a la figura 88, se muestran los datos relacionados con el desarrollo del segundo modelo experimental de laguna facultativa a escala de laboratorio.

En la tabla XCVII se muestran los resultados de la eficiencia de remoción de  $\text{DBO}_5$  de la unidad de tratamiento, de dichos resultados se puede destacar que el comportamiento de la eficiencia de remoción de  $\text{DBO}_5$  para la unidad de tratamiento presenta un comportamiento errático e incongruente, obteniéndose valores de eficiencia que van desde un valor de 40,36 %, en el segundo día de monitoreo, hasta un valor de -77,02 %, en el sexto día de monitoreo, para un período de monitoreo total de trece (13) días.

#### **5.5.2.3. Tercer modelo experimental**

Desde la tabla XCVIII hasta la tabla CXI y de la figura 89 a la figura 98, se muestran los datos relacionados con el desarrollo del tercer modelo experimental de laguna facultativa a escala de laboratorio.

En la tabla CVIII se muestran los resultados de la eficiencia de remoción de  $\text{DBO}_5$  de la unidad de tratamiento, de dichos resultados se puede destacar

que la mayor eficiencia de remoción de  $\text{DBO}_5$  obtenida es igual a 78,92 % que corresponde al sexto día de monitoreo; sin embargo, al décimo día de monitoreo se observa una disminución considerable de la eficiencia de la unidad de tratamiento, obteniéndose un resultado de 44,07 %.

#### **5.5.2.4. Cuarto modelo experimental**

Desde la tabla CXII hasta la tabla CXXII y de la figura 99 a la figura 105, se muestran los datos relacionados con el desarrollo del cuarto modelo experimental de laguna facultativa a escala de laboratorio.

En la tabla CXIX se muestran los resultados de la eficiencia de remoción de  $\text{DBO}_5$  de la unidad de tratamiento, de dichos resultados se puede destacar que la mayor eficiencia de remoción de  $\text{DBO}_5$  obtenida es igual a 58,72 % que corresponde al sexto día de monitoreo y mantuvo una tendencia ascendente durante la totalidad del período de monitoreo, igual a seis (6) días.

#### **5.5.2.5. Quinto modelo experimental**

Desde la tabla CXXIII hasta la tabla CXXXIII y de la figura 106 a la figura 112, se muestran los datos relacionados con el desarrollo del quinto modelo experimental de laguna facultativa a escala de laboratorio.

En la tabla CXXX se muestran los resultados de la eficiencia de remoción de  $\text{DBO}_5$  de la unidad de tratamiento, de dichos resultados se puede destacar que la mayor eficiencia de remoción de  $\text{DBO}_5$  obtenida es igual a 46,47 % que corresponde al sexto día de monitoreo y mantuvo una tendencia ascendente durante la totalidad del período de monitoreo, igual a seis (6) días.



#### **5.5.2.6. Resumen de la eficiencia de remoción de carga orgánica de los modelos evaluados**

En la tabla XIX se muestra el resumen de los resultados de la eficiencia de remoción de  $\text{DBO}_5$  de los modelos evaluados, de dichos resultados se puede destacar que la mayor degradación diaria de  $\text{DBO}_5$  soluble, en mg/l-día, es igual a 155,01 mg/l mientras que el valor mínimo de degradación diaria de  $\text{DBO}_5$  soluble es igual a 59,27 mg/l; asimismo se observa que la eficiencia experimental promedio correspondiente al análisis de los datos obtenidos a partir de los modelos experimentales de forma rectangular es igual 61,60% para un tiempo de retención hidráulica de seis (6) días.

Adicionalmente se determinó que el tiempo de retención hidráulica promedio requerido para alcanzar una eficiencia de remoción de  $\text{DBO}_5$  soluble en las unidades de tratamiento fue de 5,77 días o su equivalente, que es igual a 138,44 horas.

## CONCLUSIONES

1. Se concluye que la hipótesis es verdadera debido a que los resultados promedio obtenidos para las eficiencias evaluadas en los modelos experimentales, permiten el ajuste instantáneo del potencial de hidrógeno hasta un valor igual 6,14 unidades de pH y una remoción de la carga contaminante, expresada en términos de la DBO<sub>5</sub> soluble, de hasta un 61,60 %, respectivamente.
2. En base a la determinación de las características físicas, químicas y bacteriológicas del agua empleada actualmente en el proceso se concluye que dichas características no constituyen un factor que impida continuar con el aprovechamiento de la fuente para procesamiento industrial del fruto del café.
3. Se concluye que el agua empleada para el lavado y despulpado del café sufre una disminución considerable de su calidad medida en términos de una pérdida promedio de 6 mg/l de oxígeno disuelto; una acidificación severa, medida en términos de una disminución promedio de 2,93 unidades de pH; la adición de un alto contenido de materia de origen orgánico, medido en términos de contenido de sólidos volátiles; y un aumento en su contenido de nutrientes expresado como un incremento promedio de 125,12 % de contenido global de nitrógeno inorgánico y de un 418,17 % de contenido global de ortofosfatos.

4. El índice de biodegradabilidad característico del agua residual producto del procesamiento del café es igual a 0,68, por lo que se concluye que, dicha agua residual es biodegradable y, por lo tanto, se establece su factibilidad técnica de tratamiento a través de la implementación de procesos biológicos unitarios.
5. La evaluación del sistema de tratamiento actual, para las muestras analizadas, permite concluir que dicho sistema, mejora la calidad del efluente tratado hasta obtener las siguientes eficiencias promedio: remoción del 50,19 % de la DBO<sub>5</sub> soluble y remoción del 41,25 % de la DQO; además de un incremento en el potencial de hidrógeno promedio de 1,23 unidades de pH, a partir de un valor inicial de 4,35 unidades de pH hasta un valor final de 5,58 unidades de pH.
6. La evaluación del modelo de lecho de roca caliza, a escala de laboratorio, permitió concluir que sí es recomendable su implementación como unidad de tratamiento primario para el ajuste inmediato del potencial de hidrógeno de las aguas mieles generadas en un beneficio húmedo tecnificado, adicionalmente, fue factible determinar la ecuación que describe la operación del modelo en términos de la altura de medio y carga hidráulica empleadas.
7. La evaluación del modelo de laguna facultativa, a escala de laboratorio, permitió concluir que sí es recomendable su implementación como unidad de tratamiento primario para la remoción de la carga contaminante, DBO<sub>5</sub> de las aguas residuales producto del procesamiento del fruto del café en un beneficio húmedo tecnificado.

## RECOMENDACIONES

1. Continuar con la línea de investigación propuesta mediante el desarrollo del presente estudio especial.
2. Establecer una red de monitoreo de efluentes de beneficiados del café, tanto para los beneficios húmedos y/o húmedos tecnificados, categorizándolos en base a su ubicación, altura, rangos de producción, entre otros.
3. Continuar con el monitoreo de las concentraciones de hierro y manganeso detectadas en el agua para el lavado y despulpado del café en el beneficio de la cooperativa Nuevo Sendero ya que pueden surgir dificultades en la operación del sistema y los equipos de distribución internos debido a incrustaciones en las tuberías y al crecimiento de las bacterias del hierro y del manganeso, respectivamente.
4. Desarrollar un estudio especial encaminado a determinar los valores de diseño requeridos para el dimensionamiento de las unidades de homogenización de carga contaminante de las aguas mieles.
5. Implementar modelos de lechos de roca caliza a escala de planta piloto que operen de forma simultánea, al sistema de tratamiento actual, a diferentes alturas y a diferentes cargas hidráulicas que puedan servir de soporte para el desarrollo de modelos matemáticos para el dimensionamiento de las unidades de tratamiento.

6. Implementar modelos de tratamiento biológico a escala de planta piloto que funcionen de manera simultánea al sistema de tratamiento actual, con el objeto de aumentar la base de datos experimentales que puedan servir de soporte para el desarrollo de modelos matemáticos para el dimensionamiento de las unidades de tratamiento.

## BIBLIOGRAFÍA

1. AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION, AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION & WATER ENVIRONMENTAL FEDERATION. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 18<sup>th</sup> ed. Washington,DC: American Public Health Association, 1992. ISBN: 0-87553-207-1.
2. ASOCIACIÓN NACIONAL DEL CAFÉ (ANACAFE). Anzueto, Francisco & Soto, Roberto. 2011. Aguas residuales del beneficiado del café Sistemas de tratamiento, 22 Congreso Nacional del Café.
3. ASOCIACIÓN NACIONAL DEL CAFÉ (ANACAFE). Departamento desarrollo y medio ambiente. Coordinatura de medio ambiente y técnicos de poscosecha. *Avances en el tratamiento físico químico de aguas residuales del beneficiado húmero del café por medios de plantas depuradoras en Guatemala*. 2004.
4. CRITES, Ron; TCHOBANOGLOUS, George. *Sistemas de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados*. Tomo 1. Traducido de la 1<sup>a</sup> ed. en inglés. Colombia: McGraw-Hill Interamericana, S.A., 2000. 343 p. ISBN: 958-41-0044-0.
5. \_\_\_\_\_. *Sistemas de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados*. Tomo 2. Traducido de la 1<sup>a</sup> ed. en inglés. Colombia: McGraw-Hill Interamericana, S.A., 2000. 358 p. ISBN: 958-41-0045-9.

6. \_\_\_\_\_. *Sistemas de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados*. Tomo 3. Traducido de la 1ª ed. en inglés. Colombia: McGraw-Hill Interamericana, S.A., 2000. 342 p. ISBN: 958-41-0046-7.
7. \_\_\_\_\_. *Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones*. Traducido de la 1ª ed. en inglés. Bogotá: McGraw-Hill Interamericana, S.A., 2000. 776 p. ISBN:958-41-0042-4.
8. ESCUELA REGIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA Y RECURSOS HÍDRICOS (ERIS). *Manual de prácticas de laboratorio. Química del agua*, 2012.
9. ESCUELA REGIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA Y RECURSOS HÍDRICOS (ERIS). *Manual de prácticas de laboratorio. Química sanitaria*, 2012.
10. METCALF & EDDY, INC. *Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización. Tomo I*. 1ª ed. en español. México, D.F.: McGraw-Hill/Interamericana Editores, 1996. 752 p. ISBN: 970-10-1005-1.
11. OAKLEY, Stewart M., Dr. *Lagunas de estabilización en Honduras. Manual de diseño, construcción, operación y mantenimiento, monitoreo y sostenibilidad*. 2005. 247 p.
12. ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. *Calidad del agua*. 3a ed. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2009. 484 p. ISBN: 978-958-8060-83-5.

13. \_\_\_\_\_. *Tratamiento de Aguas Residuales, Teoría y principios de diseño*. 3a ed. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2010. 1248 p. ISBN: 958-8060-13-3.
14. RODRÍGUEZ TOLEDO, Héctor Guillermo. "Beneficio ecológico del café (coffea arábica l.), para protección del medio ambiente" Universidad San Carlos de Guatemala, Facultad de Agronomía, Instituto de Investigaciones Agronómicas. Documento de Graduación, julio 2003.
15. SARAIVIA CELIS, Pedro, M.Sc. *Contaminación del agua*. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala. 95 p.
16. SAWYER, Clair N.; McCARTY, Perry L.; PARKIN, Gene F. *Química para Ingeniería Ambiental*. 4a ed. Bogotá: McGraw Hill, 2001. 713 p. ISBN: 958-41-0164-1.
17. YÁÑEZ COSSÍO, Fabián, Ph.D. *Lagunas de estabilización. Teoría, diseño, evaluación y mantenimiento*, 1993.





## **ANEXOS**

- I. Ejemplo de dimensionamiento de lecho de roca caliza con base en los resultados experimentales obtenidos
- II. Datos de insolación solar promedio de 10 años para el área de Ciudad Guatemala
- III. Registro fotográfico

**Anexo I: Ejemplo de dimensionamiento de lecho de roca caliza con base en los resultados experimentales obtenidos**

En base a los resultados obtenidos en la tabla XVII, la tabla XVIII y la figura 17 se procedió a dimensionar una unidad de lecho de roca caliza para el ajuste instantáneo del potencial de hidrógeno de las aguas mieles caracterizadas para el beneficio húmedo tecnificado de la Cooperativa Nuevo Sendero.

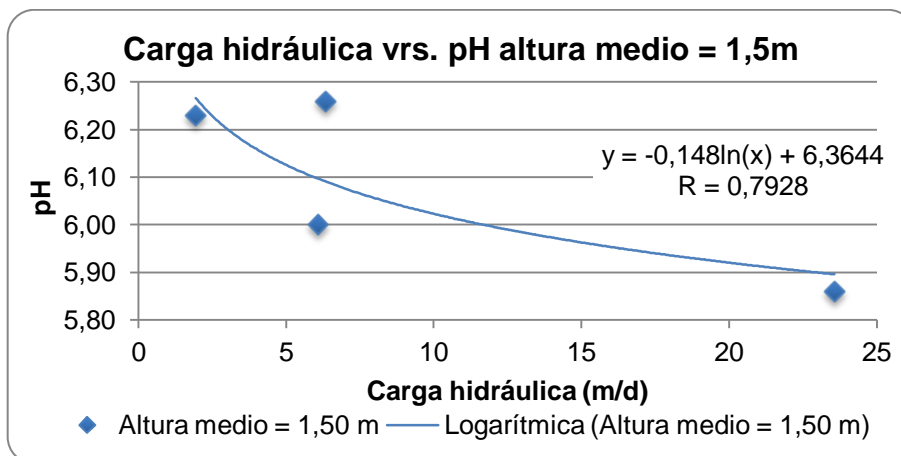
Los datos de partida para el diseño del lecho de roca caliza son los siguientes:

**Tabla XVII. Carga hidráulica y pH para lechos de roca caliza de 1,50 m**

Fecha	Altura del medio	Carga hidráulica, Q/A (m/d)	pH inicial	pH final	$\Delta$ pH
25/02/2013	1,50	23,56	5,47	5,86	0,39
25/02/2013	1,50	6,07	5,47	6,00	0,53
26/02/2013	1,50	6,33	4,96	6,26	1,30
26/02/2013	1,50	1,94	4,96	6,23	1,27

Fuente: elaboración propia.

Figura 17. **Carga hidráulica y pH para lechos de roca caliza de 1,50 m**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. **Carga hidráulica admisible para pH = 6,2 en los lechos de roca caliza**

Altura de medio	Ecuación	pH	Carga hidráulica admisible (m/d)
1,00 m	$y = -0,188\ln(x) + 6,7728$	6,20	21,050
1,50 m	$y = -0,148\ln(x) + 6,3644$	6,20	3,037

Fuente: elaboración propia.

De la tabla anterior se obtiene que el valor de carga hidráulica correspondiente a la obtención de un potencial de hidrógeno de 6,2 para una altura de lecho de roca caliza es igual a 3,037 m/día.

Se considera una capacidad del equipo de bombeo igual a 3 litros/segundo (0,003 m<sup>3</sup>/s, 259,60 m<sup>3</sup>/día, 0,18 m<sup>3</sup>/minuto) y un volumen de agua diario máximo durante el 90% del tiempo de producción igual a 30 m<sup>3</sup>.

Con los datos anteriores se obtiene el tiempo de bombeo requerido, según la siguiente ecuación:

$$\text{Tiempo de bombeo} = \frac{\text{Caudal de bombeo}}{\text{Volumen}} = \frac{0,003 \text{ m}^3/\text{s}}{30,00 \text{ m}^3} = 10 \text{ 000 segundos}$$

$$\text{Tiempo de bombeo} = 166,67 \text{ minutos} = 2,78 \text{ horas}$$

El área total del lecho de roca caliza es la siguiente:

$$\text{Área del lecho} = \frac{\text{Capacidad de la bomba}}{\text{Carga hidráulica}} = \frac{259,69 \text{ m}^3/\text{día}}{3,037 \text{ m}/\text{día}} = 85,35 \text{ m}^2$$

Si se consideran dos módulos de igual área se obtienen las siguientes dimensiones:

$$\text{Área de cada módulo} = \frac{\text{Área del lecho}}{2} = \frac{85,35 \text{ m}^2}{2} = 42,67 \text{ m}^2$$

$$\text{Área de módulo} = a \times b; \quad \text{donde } b = 2a \quad \therefore \text{Área de modulo} = 2a^2$$

Donde:

a = Ancho del lecho

b = Largo del lecho

Por lo tanto, las dimensiones de cada uno de los módulos son las siguientes:

$$\text{Ancho del lecho (a)} = \sqrt{\frac{\text{Área de modulo}}{2}} = \sqrt{\frac{42,67 \text{ m}^2}{2}} = 4,62 \text{ m}$$

$$\text{Largo del lecho (b)} = 2 \times \text{Ancho del lecho} = 2 \times 4,62 \text{ m} = 9,24 \text{ m}$$

Considerando una profundidad de medio de roca caliza igual a 1,50 m, se obtiene un volumen de lecho total igual a:

$$\text{Volumen del lecho} = \text{Área} \times \text{Profundidad} = 85,35 \text{ m}^2 \times 1,50 \text{ m} = 64,01 \text{ m}^3$$

Para una carga hidráulica volumétrica igual a:

$$\text{Carga volumétrica} = \frac{\text{Caudal máximo}}{\text{Volumen del lecho}} = \frac{30,00 \text{ m}^3/\text{día}}{64,01 \text{ m}^3} = 0,4687 \text{ día}$$

## Anexo II: Datos de insolación solar promedio de 10 años para el área de Ciudad Guatemala

Los datos de insolación solar promedio de 10 años para el área de Ciudad Guatemala son los siguientes:

NASA Surface meteorology and Solar Energy - Available Tables

Latitude 14,59 / Longitude -90,55 was chosen,

Geometry Information Elevation: 744 meters

taken from the NASA GEOS-4

model elevation

Northern boundary 15

Western boundary -91 Center

Latitude 14,5

Longitude -90,5 Eastern boundary

-90

Southern boundary 14

Parameters for Sizing and Pointing of Solar Panels and for Solar Thermal Applications:

Monthly Averaged Insolation Incident On A Horizontal Surface (kWh/m<sup>2</sup>/day)

Lat 14,59

Lon -90,55

Average

22-year Average

Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul
5,18	5,73	6,02	6,05	5,48	5,16	5,45
Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Annual	
5,34	4,73	4,76	4,9	4,95	5,31	

Minimum And Maximum Difference From Monthly Averaged Insolation (%)

Lat 14,59

Lon -90,55

Minimum

Maximum

Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun
-10	-8	-4	-9	-15	-7
7	9	6	9	14	11
Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
-13	-24	-15	-11	-13	-8
10	8	12	14	10	10

### Anexo III: Registro fotográfico



Ingreso del fruto del café al beneficio



Fruto del café, posterior al proceso de despulpado y fermentación



Proceso del lavado del café



Ingreso de agua limpia para lavar el café despulpado y fermentado





Proceso de muestreo



Almacenamiento de las muestras



Análisis de sólidos sedimentables



Análisis de DQO



Análisis de sólidos totales



Sólidos volátiles



Sólidos suspendidos



Sólidos suspendidos





Modelos de lecho de roca caliza



Vista del modelo de roca caliza



Modelo de laguna facultativa



Vista del modelo de laguna facultativa



Vista la cantidad de lodos sedimentados



Vista de parte de la vida acuática en las lagunas de escala de laboratorio