



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**EVALUACIÓN DEL TRANSPORTE DE NUTRIENTES Y MATERIA
ORGÁNICA A TRAVÉS DEL SUBSUELO Y EN EL FLUJO DE AGUA DE LA
FOSA DE INFILTRACIÓN DE UN BENEFICIO HÚMEDO DE CAFÉ, UBICADO
EN LA ALDEA SAN ANTONIO CHACAYÁ, SANTIAGO ATITLÁN, SOLOLÁ**

Doris Yuritza Vega Montenegro

Asesorado por el Ing. José Manuel Tay Oroxom

Guatemala, julio de 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DEL TRANSPORTE DE NUTRIENTES Y MATERIA
ORGÁNICA A TRAVÉS DEL SUBSUELO Y EN EL FLUJO DE AGUA DE LA
FOSA DE INFILTRACIÓN DE UN BENEFICIO HÚMEDO DE CAFÉ, UBICADO
EN LA ALDEA SAN ANTONIO CHACAYÁ, SANTIAGO ATITLÁN, SOLOLÁ**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

DORIS YURITZA VEGA MONTENEGRO
ASESORADO POR EL ING. MANUEL TAY OROXOM

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA

GUATEMALA, JULIO DE 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Juan Carlos Molina Jiménez
VOCAL V	Br. Mario Maldonado Muralles
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Otto Raúl De León de Paz
EXAMINADOR	Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus
EXAMINADOR	Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

EVALUACIÓN DEL TRANSPORTE DE NUTRIENTES Y MATERIA ORGÁNICA A TRAVÉS DEL SUBSUELO Y EN EL FLUJO DE AGUA DE LA FOSA DE INFILTRACIÓN DE UN BENEFICIO HÚMEDO DE CAFÉ, UBICADO EN LA ALDEA SAN ANTONIO CHACAYÁ, SANTIAGO ATITLÁN, SOLOLÁ

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 15 de marzo de 2011.

Doris Yuritza Vega Montenegro



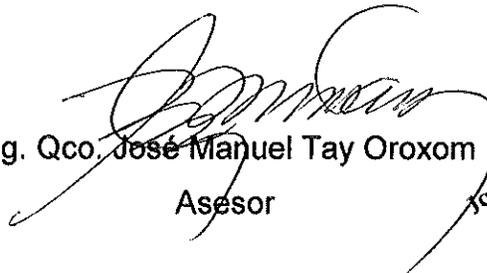
Guatemala, 11 de abril del 2012

Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
Director Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Universidad San Carlos de Guatemala
Guatemala

Señor Director:

Por medio de la presente le hago constar que he revisado el informe final del trabajo de graduación de la estudiante Doris Yuritza Vega Montenegro quien se identifica con número de carné 2006-11153 titulado: "Evaluación del transporte de nutrientes y materia orgánica a través del subsuelo y en el flujo de agua de la fosa de infiltración de un beneficio húmedo de café, ubicado en la Aldea San Antonio Chacayá, Santiago Atitlán, Sololá"

El informe final mencionado lo encuentro satisfactorio y merece la aprobación.
Sin otro particular me suscribo.


Ing. Qco. José Manuel Tay Oroxom
Asesor

José Manuel Tay Oroxom
Ma. Ingeniero Químico
Colegiado No. 121



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
 FACULTAD DE INGENIERÍA
 ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

Guatemala, 30 de mayo de 2012
 Ref. EI.Q.TG-IF.028.2012

Ingeniero
 Williams Guillermo Álvarez Mejía
 DIRECTOR
 Escuela Ingeniería Química
 Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el Acta TG-161-2011-IF le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

Solicitado por la estudiante universitaria: **Doris Yuritz Vega Montenegro**

Identificada con número de carné: **2006-11153**

Previo a optar al título de INGENIERA QUÍMICA.

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

EVALUACIÓN DEL TRANSPORTE DE NUTRIENTES Y MATERIA ORGÁNICA A TRAVÉS DEL SUBSUELO Y EN EL FLUJO DE AGUA DE LA FOSA DE INFILTRACIÓN DE UN BENEFICIO HÚMEDO DE CAFÉ UBICADO EN LA ALDEA SAN ANTONIO CHACAYÁ, SANTIAGO ATITLÁN, SOLOLA

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero: **Manuel Tay Oroxom.**

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

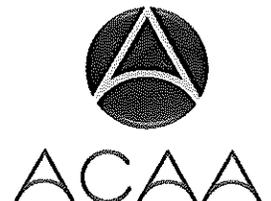
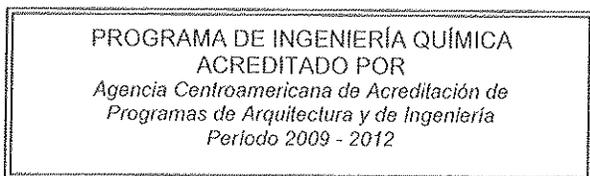
"DÉJEME Y ENSEÑAD A TODOS"

Ing. César Alfonso García Guerra
 COORDINADOR DE TERNA
 Tribunal de Revisión
 Trabajo de Graduación



ESCUELA DE
 INGENIERIA QUIMICA

C.c.: archivo





El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación de la estudiante, **DORIS YURITZA VEGA MONTENEGRO** titulado: "**EVALUACIÓN DEL TRANSPORTE DE NUTRIENTES Y MATERIA ORGÁNICA A TRAVÉS DEL SUBSUELO Y EN EL FLUJO DE AGUA DE LA FOSA DE INFILTRACIÓN DE UN BENEFICIO HÚMEDO DE CAFÉ UBICADO EN LA ALDEA SAN ANTONIO CHACAYÁ, SANTIAGO ATILÁN, SOLOLÁ**". Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química

Guatemala, Julio de 2012



Cc: Archivo
VMMV/ale



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **EVALUACIÓN DEL TRANSPORTE DE NUTRIENTES Y MATERIA ORGÁNICA A TRAVÉS DEL SUBSUELO Y EN EL FLUJO DE AGUA DE LA FOSA DE INFILTRACIÓN DE UN BENEFICIO HÚMEDO DE CAFÉ UBICADO EN LA ALDEA SAN ANTONIO CHACAYÁ, SANTIAGO ATITLÁN, SOLOLÁ**, presentado por la estudiante universitaria: **Doris Yuritza Vega Montenegro**, procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olympo Paiz Resinos
DECANO



Guatemala, julio de 2012

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por el milagro que hace en nosotros cada día.
El pueblo de Guatemala	A todas las personas que se vieron involucradas en mi formación. Haré de mi profesión una fuente de servicio.
Mis padres	Dora Montenegro y Sergio Vega, gracias por ser mi inspiración, mi luz, mi ánimo y el acto de bondad más grande de Dios hacia mí.
Mis hermanos y familia	Alexander, Lester y Williams. A mis tíos, tías, primos y primas por estar siempre a mi lado y apoyarme en cada momento.
Mis abuelos	Carmela Arias, Lauro Montenegro y Magdalena Escobar, por confiar en mí e inspirar mi vida.
José Andrés Vargas Aguilar	Por su amor, comprensión, ánimo, entrega y altruismo. Por cada eco-actor que ha nacido gracias a su trabajo y esfuerzo en pro del ambiente.
Sor Inmaculada	Por su ejemplo, sus enseñanzas y su entrega en la formación académica y espiritual.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por las dádivas otorgadas y por la oportunidad que me ha dado para prepararme y hacer de éste, un mundo mejor.
Universidad de San Carlos de Guatemala	Por haberme aceptado y formado a lo largo de estos años. En especial a la Facultad de Ingeniería y, aquellos que dedicaron un minuto de su vida para mi crecimiento integral. En especial al Ing. Manuel Tay.
Mis padres y abuelos	Gracias por ser mi ejemplo, la muestra de integridad y del amor de Dios más latente en mi vida.
Mi familia	Hermanos, gracias por su incondicional apoyo; tíos, tías, primos y primas, gracias por cada palabra de ánimo. José Vargas gracias por iluminar mi vida.
ANACAFE	Por haberme brindado la oportunidad de apoyar a los caficultores del país. En especial al Ing. Roberto Soto por su constante contribución y motivación.
CEDICAFE-ANALAB	Por su colaboración en la realización de esta investigación y en el análisis de las muestras. En especial al Ing. Humberto Jiménez y al Dr. Francisco Anzueto.

Beneficio de café San Isidro Chacayá	Por el apoyo incondicional y enseñarme el valor de una vida pacífica y trabajadora. En especial a Mario Cabrera y Leonzo Vásquez.
Centro de Investigaciones de Ingeniería	Por realizar los ensayos en el laboratorio de Mecánica de Suelos. En especial a José Istupe y Mario Maldonado.
Laboratorio de Investigación	Química y Ambiental: por su apoyo en la realización de los análisis de laboratorio de la calidad del agua.
ESIQ 2010	Gracias por ese año constante de lucha y de entrega, por cada experiencia que nos ayudó a ser mejores.
Mis amigos	Gracias por caminar junto a mí en este hermoso aprendizaje, forjado con esfuerzo y transparencia.
David Santizo y Verbum Dei	Por ser fieles a su corazón y a Dios principalmente. Gracias por acompañar mi formación espiritual.
Movimiento de escultismo	Por enseñarme a encausar cada decisión hacia una vida de servicio y ayuda al prójimo.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	XIII
GLOSARIO	XV
RESUMEN.....	XIX
OBJETIVOS/HIPÓTESIS.....	XXI
INTRODUCCIÓN	XXV
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO	3
2.1. El suelo	3
2.1.1. Horizontes	3
2.1.2. Propiedades físicas del suelo	4
2.1.2.1. Textura	4
2.1.2.2. Porosidad	6
2.1.2.3. Permeabilidad	6
2.1.2.4. Contenido de humedad	7
2.1.3. Química del suelo	7
2.1.3.1. Meteorización	8
2.1.3.2. Acidez del suelo	8
2.1.3.3. Capacidad de intercambio catiónico.....	9
2.1.3.4. Nutrientes	9
2.1.3.5. Poder depurador de materiales.....	13

2.2.	Procesos hidrológicos	13
2.2.1.	Ciclo hidrológico.....	13
2.2.2.	Flujo de agua en el subsuelo	15
2.2.2.1.	Zona no saturada	15
2.2.2.2.	Zona saturada.....	15
2.3.	El café	16
2.3.1.	Frutos del café y su composición química.....	16
2.3.2.	Beneficio húmedo de café.....	18
2.3.2.1.	Etapas del proceso	18
2.3.2.2.	Agua de abastecimiento y descarga ..	20
2.4.	Agua residual.....	21
2.4.1.	Caracterización de aguas residuales.....	21
2.4.1.1.	Parámetros fisicoquímicos	21
2.4.1.2.	Nutrientes.....	22
2.4.1.3.	Parámetros relacionados con la biodegradabilidad.....	23
2.4.2.	Composición química de las aguas residuales del café.....	23
2.4.3.	Sistemas de tratamiento de agua residual	24
2.4.3.1.	Niveles de tratamiento	24
2.4.3.2.	Tratamiento del agua residual del café.....	26
3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	27
3.1.	Variables	27
3.1.1.	Variables de control.....	27
3.1.2.	Variables respuesta.....	29
3.2.	Delimitación del campo de estudio	29

3.2.1.	Tipo de estudio	30
3.2.2.	Población de estudio.....	30
3.3.	Recursos humanos	30
3.4.	Recursos materiales	31
3.4.1.	Análisis de muestras.....	31
3.4.1.1.	Equipo de medición en campo	31
3.4.1.2.	Toma de muestras de agua.....	31
3.4.1.3.	Toma de muestras de suelo	31
3.4.2.	Monitoreo	32
3.4.2.1.	Periodicidad.....	32
3.4.3.	Área de influencia de las fosas de infiltración	33
3.4.4.	Sistema de recolección de agua de infiltración	34
3.4.4.1.	Líneas de infiltración.....	35
3.4.4.2.	Ángulo del canal	35
3.4.4.3.	Diseño de los orificios.....	36
3.4.4.4.	Área de captación	37
3.4.4.5.	Área transversal de flujo.....	40
3.4.5.	Caudal de agua residual	41
3.4.6.	Análisis químico	42
3.4.6.1.	Análisis de la calidad del agua	42
3.4.6.2.	Análisis de la calidad del suelo.....	45
3.4.6.3.	Acuerdo Gubernativo 12-2011	46
3.5.	Técnica cuantitativa y cualitativa.....	47
3.6.	Análisis estadístico	48
4.	CARACTERIZACIÓN DEL EMPLAZAMIENTO	51
4.1.	Topografía	51
4.1.1.	Orientación.....	51
4.1.2.	Pendiente.....	52

4.2.	Caracterización física y química del suelo.....	52
4.2.1.	Caracterización física del suelo	53
4.2.1.1.	Análisis granulométrico	54
4.2.1.2.	Textura	55
4.2.1.3.	Porosidad.....	57
4.2.1.4.	Permeabilidad	58
4.2.2.	Composición química	59
4.2.2.1.	Capacidad de intercambio catiónico ..	59
4.2.2.2.	Conductividad eléctrica	61
4.3.	Climatología.....	63
4.3.1.	Precipitación pluvial y humedad relativa.....	63
4.3.2.	Viento	65
5.	RESULTADOS	67
5.1.	Calidad del agua contenida en las fosas de infiltración durante el período de descarga e infiltración.....	67
5.2.	Análisis químico del suelo y de la calidad del agua infiltrada ...	74
5.2.1.	Potencial de hidrógeno –pH-	75
5.2.2.	Concentración de la materia orgánica en el suelo y en el agua.....	78
5.2.3.	Sólidos totales suspendidos	82
5.3.	Análisis de la concentración de las especies del nitrógeno en el agua infiltrada y en el suelo.....	83
5.3.1.	Concentración del nitrógeno y sus especies en el agua infiltrada	83

5.3.2.	Concentración del nitrógeno y sus especies en el suelo.....	90
5.3.2.1.	Porcentaje de nitrógeno disponible ..	90
5.3.2.2.	Variación de la concentración de amonio en el suelo, en función del tiempo.....	94
5.3.2.3.	Variación de la concentración de nitratos en el suelo, en función del tiempo.....	98
5.4.	Concentración de fósforo total.....	103
5.4.1.	Variación de la concentración del fósforo total en el agua infiltrada.....	103
5.4.2.	Concentración del fósforo disponible en el suelo.....	105
6.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	111
	CONCLUSIONES	125
	RECOMENDACIONES.....	127
	BIBLIOGRAFÍA.....	129
	APÉNDICES	133
	ANEXOS.....	149

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Diagrama triangular para determinación de textura del suelo.....	5
2.	Diagrama del ciclo del nitrógeno.....	10
3.	Diagrama de fijación del fósforo en el suelo.....	12
4.	Componentes del ciclo hidrológico.....	14
5.	Compuestos relevantes en la pulpa de café.....	17
6.	Composición química porcentual del mucílago.....	17
7.	Estimación de caudales máximos (litros diarios).....	20
8.	Puntos de monitoreo para la toma de muestras.....	34
9.	Arreglo triangular de los orificios.....	38
10.	Construcción de las líneas de infiltración.....	41
11.	Diagrama de flujo de las actividades desarrolladas.....	48
12.	Perfil estratigráfico de la calicata No. 1.....	53
13.	Perfil estratigráfico de la calicata No. 3.....	54
14.	Precipitación pluvial (mm/día) y temperatura ambiente (°C).....	64
15.	Evapotranspiración de tanque (mm) y humedad relativa, máxima, mínima y promedio (%).....	64
16.	Nivel del agua en la fosa de infiltración en función del tiempo.....	68
17.	Variación del pH en función del tiempo, en la fosa de infiltración 7.....	69
18.	Demanda bioquímica de oxígeno en función del tiempo, en la fosa de infiltración No. 7.....	70
19.	Concentración de los sólidos totales suspendidos en función del tiempo, en la fosa de infiltración No. 7.....	71

20.	Concentración del nitrógeno total Kjendhal en función del tiempo, en la fosa de infiltración No. 7.....	72
21.	Concentración del fósforo total en función del tiempo, en la fosa de infiltración No. 7.....	73
22.	Variación del pH a diferentes profundidades, 1,50 m de distancia de la fosa No. 7, en función del tiempo	75
23.	Variación del pH a diferentes profundidades, 3,00 m de distancia de la fosa No. 7, en función del tiempo.....	76
24.	Variación de la concentración de la demanda bioquímica de oxígeno entre los diferentes puntos de observación.....	78
25.	Variación de la materia orgánica (%), entre los diferentes puntos de observación a 1,5m y 3,0 m de distancia.....	80
26.	Variación de la materia orgánica (%), entre los diferentes puntos de observación de la calicata testigo	81
27.	Variación de la concentración de sólidos totales suspendidos en el agua de infiltrada entre los diferentes puntos de observación.....	82
28.	Concentración de nitrógeno total, en los puntos diferentes puntos de observación, en función del tiempo.....	84
29.	Variación de la concentración de nitrógeno de amonio, en los diferentes puntos de observación, en función del tiempo.....	85
30.	Variación de la concentración de nitrógeno de nitritos, en los diferentes puntos de observación, en función del tiempo.....	86
31.	Variación de la concentración de nitrógeno de nitratos, en los diferentes puntos de observación, en función del tiempo.....	87
32.	Variación del nitrógeno disponible a diferentes profundidades, a 1,50 m y 3,0 m de distancia desde la fosa No. 7.....	91
33.	Variación del nitrógeno disponible a diferentes profundidades, en la calicata No.3 , testigo, en función del tiempo.....	92

34.	Variación de la concentración de amonio, a diferentes profundidades en la calicata No.1, 1,50 m de distancia de la fosa No. 7 en función del tiempo.....	95
35.	Variación de la concentración de amonio, a diferentes profundidades en la calicata No.1, 3,00 m de distancia de la fosa No. 7 en función del tiempo.....	96
36.	Variación de la concentración de amonio, a diferentes profundidades en la calicata testigo.....	97
37.	Variación de la concentración de nitratos, a diferentes profundidades en la calicata No.1, 1,50 m de distancia de la fosa No. 7 en función del tiempo.....	99
38.	Variación de la concentración de nitratos, a diferentes profundidades en la calicata No.1, 3,00 m de distancia de la fosa No. 7 en función del tiempo.....	100
39.	Variación de la concentración de nitratos, a diferentes profundidades en la calicata testigo, en función del tiempo.....	101
40.	Concentración del fósforo total (kg/m^3), a diferentes profundidades y distancias de la fosa No. 7 en función del tiempo.....	104
41.	Concentración del fósforo disponible en el suelo de la fosa de infiltración No. 7, en función del tiempo.....	106
42.	Concentración del fósforo disponible a diferentes profundidades, 1,50 y 3,0 m de distancia desde la fosa 7.....	107
43.	Concentración del fósforo disponible en la calicata testigo a diferentes profundidades, en función del tiempo.....	108
44.	Volumen de agua recuperado en los puntos de monitoreo.....	114
45.	Variación del porcentaje de materia orgánica en el suelo, en la fosa de infiltración No. 7.....	118
46.	Especies del nitrógeno en la fosa de infiltración No. 7.....	121

TABLAS

I.	Análisis del ambiente externo.....	27
II.	Definición operacional de las variables de control.....	28
III.	Definición operacional de las variables respuesta.....	29
IV.	Frecuencia del monitoreo del agua.....	32
V.	Frecuencia del monitoreo del suelo.....	33
VI.	Diseño de los colectores para una pendiente del 1 por ciento..	36
VII.	Caudal másico de agua residual descargada semanalmente.....	42
VIII.	Definición del modelo estadístico.....	49
IX.	Pendientes de inclinación de los puntos de monitoreo.....	52
X.	Análisis granulométrico para las diferentes estratos.....	55
XI.	Textura para el suelo de la pared lateral y el suelo del fondo de la fosa de infiltración No. 7, antes de la infiltración.....	56
XII.	Textura para el suelo de la pared lateral y el suelo del fondo de la fosa de infiltración No. 7, después de la infiltración.....	56
XIII.	Textura para los diferentes estratos de la calicata No. 2.....	56
XIV.	Clase textural, puntos de observación en la calicata No. 1.....	57
XV.	Textura para los diferentes estratos de la calicata No. 3.....	57
XVI.	Densidad de partículas, densidad aparente y porcentaje de porosidad para los diferentes estratos de la calicata No. 1.....	58
XVII.	Ensayos de permeabilidad para los diferentes tipos de suelo, expresados como coeficiente de permeabilidad.....	59
XVIII.	Capacidad de intercambio catiónico y pH para los diferentes puntos a 1,50 m de distancia de la fosa 7.....	60
XIX.	Capacidad de intercambio catiónico y pH para los diferentes puntos a 3,00 m de distancia de la fosa 7..	60
XX.	Capacidad de intercambio catiónico y pH para los diferentes estratos de la fosa de infiltración No. 7.....	61

XXI.	Capacidad de intercambio catiónico y potencial de hidrógeno para los diferentes estratos de la calicata testigo.....	61
XXII.	Conductividad eléctrica para la fosa de infiltración.....	62
XXIII.	Conductividad eléctrica, estratos a 1,50 m de distancia de la fosa de infiltración	62
XXIV.	Conductividad eléctrica para las diferentes profundidades a 3,0 m de distancia.....	62
XXV.	Conductividad eléctrica para la calicata testigo.....	63
XXVI.	Dirección y velocidad del viento, expresada en kilómetros por hora, de enero a junio.....	65
XXVII.	Análisis de varianza para el potencial de hidrógeno.....	77
XXVIII.	Prueba de Tuckey, para el pH, a dos distancias desde la fosa No. 7.....	77
XXIX.	Prueba de Tuckey, para el pH, a diferentes profundidades.....	77
XXX.	Análisis de varianza para la DBO ₅ en el agua.....	79
XXXI.	Prueba de Tuckey para la variación de la DBO ₅ a diferentes profundidades.....	79
XXXII.	Análisis de varianza para la materia orgánica en el suelo.....	81
XXXIII.	Análisis de varianza para los STS, entre los diferentes puntos de monitoreo.....	83
XXXIV.	Análisis de varianza para el nitrógeno total, entre los diferentes puntos de observación de la fosa No. 7.....	88
XXXV.	Análisis de varianza para el nitrógeno de amonio, entre los diferentes puntos de observación de la fosa No. 7.....	88
XXXVI.	Análisis de varianza para el nitrógeno de nitratos, entre los diferentes puntos de observación de la fosa No. 7.....	89
XXXVII.	Análisis de varianza para el nitrógeno de nitritos, entre los diferentes puntos de observación de la fosa No. 7.....	89

XXXVIII.	Análisis de varianza para el porcentaje de nitrógeno disponible, entre los diferentes puntos de observación en el suelo.....	93
XXXIX.	Prueba de Tuckey para el porcentaje de nitrógeno disponible a diferentes distancias.....	93
XL.	Prueba de Tuckey para el porcentaje de nitrógeno disponible a diferentes profundidades.....	94
XLI.	Análisis de varianza para el amonio, entre los diferentes puntos de observación en el suelo.....	98
XLII.	Análisis de varianza para el nitrato, entre los diferentes puntos de observación en el suelo.....	102
XLIII.	Prueba de Tuckey para la variación del nitrato en las diferentes profundidades.....	102
XLIV.	Análisis de varianza para el fosforo total entre los diferentes puntos de observación en el agua.....	105
XLV.	Análisis de varianza para el fosforo disponible entre los diferentes puntos de observación en el suelo.....	109
XLVI.	Prueba de Tuckey para la variación del fósforo disponible en las diferentes distancias.....	109
XLVII.	Prueba de Tuckey para la variación del fósforo disponible en las diferentes profundidades.....	110

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
θ	Ángulo de la sección del arco
A	Área de orificio
A_f	Área transversal de flujo
CIC	Capacidad de intercambio catiónico
m	Caudal másico
cmol/l	Centimol por litro
R²	Coefficiente de correlación
CV	Coefficiente de variación
C_i	Concentración del parámetro de interés
[H⁺]	Concentración molar de acidez
F	Criterio prueba de Fisher
$\Delta[C]_{i\%}$	Diferencia porcentual en la concentración del parámetro de interés y el límite máximo permisible
ξ	Energía
EE	Error estándar
PT	Fósforo total
°	Grados
°C	Grados Celsius
GL	Grados de libertad
R	Grupo funcional
H_a	Hipótesis alterna
H_o	Hipótesis nula

kg	Kilogramo
kg/m³	Kilogramo por metro cúbico (concentración)
lb	Libras
LMP	Límite máximo permisible
LM_{in}P	Límite mínimo permisible
l	Litro
L_a	Longitud del arco
CM	Media de cuadrados
m	Metro
m³	Metro cúbico
msnm	Metros sobre el nivel del mar
mm	Milimetro
'	Minutos
NT	Nitrógeno total
N_A	Número de líneas de infiltración
N_L	Número de orificios por línea de infiltración
N_T	Número total de orificios
W	Peso
η	Porosidad
pH	Potencial de hidrógeno
P	Probabilidad
plg	Pulgada
r	Radio
''	Segundos
STS	Sólidos totales suspendidos
S.C	Suma de cuadrados
%	Tanto por ciento
t	Tiempo

GLOSARIO

Acuerdo Gubernativo 12-2011	Reglamento de vertidos para cuerpos receptores de la cuenca del lago de Atitlán, regula los la calidad del efluente estableciendo los límites máximos y mínimos permisibles.
Capacidad de intercambio catiónico	Capacidad que tiene un suelo para retener y liberar iones positivos debido al contenido de arcillas y materia orgánica.
Conductividad eléctrica	Medida de la concentración total de sales solubles ionizadas.
Demanda bioquímica de oxígeno	Es la cantidad de oxígeno requerida para degradar la materia orgánica mediante la acción de microorganismos en 5 días. Se abrevia DBO ₅ .
Fósforo disponible	Concentración de fósforo disponible para la asimilación de las plantas, las cuales lo aprovechan en forma de ortofosfatos monovalentes y divalentes.
Fósforo total	Suma de la concentración de fósforo en sus formas orgánicas e inorgánicas.

Horizontes del suelo	Capas que conforman el suelo, las cuales tienen diferentes propiedades y composición química.
Infiltración	Proceso de entrada del agua hacia el suelo, partiendo de su movimiento desde la superficie.
Materia orgánica del suelo	Es la conformada por constituyentes orgánicos, material vegetal, tejidos animales sin degradar, productos de descomposición parcial y biomasa del suelo.
Mineralización del nitrógeno	Conversión del nitrógeno orgánico en nitrógeno mineral mediante la descomposición de los compuestos orgánicos por acción de los microorganismos.
Nitrógeno disponible	Nitrógeno en el suelo a ser asimilado por la planta, estimulando su crecimiento, síntesis de clorofila, de aminoácidos y de proteínas.
Nitrógeno total	Suma de la concentración de nitrógeno en sus formas tales como nitrógeno Kjeldahl, nitritos y nitratos.
Nitrógeno total Kjeldahl	Suma del nitrógeno orgánico y ion amonio NH_4^+ .
Percolación	Filtración del agua a través de los horizontes del suelo hasta la capa impermeable, la capa saturada o el nivel freático.

Perfil del suelo	Corte vertical del suelo realizado para analizar los horizontes que lo conforman.
Potencial de hidrógeno	Medida de la acidez de una sustancia.
Precipitación	Cantidad de agua que ingresa al ciclo hidrológico, ya sea como lluvia, granizo o nieve.
Sólidos suspendidos totales	Partículas orgánicas e inorgánicas con un diámetro mayor a 1,2 micras que se encuentran dispersas en solución: sedimentables, coloidales o simplemente suspendidas.
Suelo arcilloso	Compuesto por rocas sedimentarias finas, principalmente silicatos de aluminio hidratados. Posee propiedades coloidales y capacidad de intercambio iónico elevada.
Suelo arenoso	Suelo que carece de propiedades coloidales, no reserva nutrientes, tiene buena aireación y alta permeabilidad, con un tamaño de partículas entre 0,05 a 2,0 mm.
Suelo limoso	Suelo sin propiedades coloidales, impermeable y con mala aireación, las partículas miden entre 0,002 a 0,05 mm.
Textura del suelo	Composición granulométrica en función del contenido de arcilla, limo y arena.

RESUMEN

El estudio de la fosa de infiltración de las aguas residuales de un beneficio húmedo de café ubicado en el municipio de Santiago Atitlán del departamento de Sololá, tuvo como objetivo determinar la variación espacial y temporal de la calidad del agua y la concentración de nutrientes en el suelo.

Se realizó la evaluación del recorrido de los parámetros de interés, nutrientes y materia orgánica, en el área de influencia a través del muestreo del agua en la fosa de infiltración No. 7 y en los puntos ubicados a 3 profundidades y 2 distancias a lo largo de la pendiente del terreno. La calidad del agua infiltrada no presentó variación significativa en la demanda bioquímica de oxígeno, ni en la concentración de fósforo total y las especies del nitrógeno (nitrógeno total, amonios, nitritos y nitratos). Sin embargo, presentó variación significativa para el potencial de hidrógeno y los sólidos totales suspendidos, los cuales disminuyeron gradual y proporcionalmente con la profundidad y la distancia.

La caracterización del suelo y de su composición química requirió la extracción de 8 muestras a diferentes profundidades desde la superficie del terreno. Existió variación significativa para la concentración de fósforo disponible y para el porcentaje de materia orgánica y nitrógeno disponible. La calidad del agua se comparó con el artículo 13, Acuerdo Gubernativo 12-2011 Reglamento de vertidos para cuerpos receptores de la cuenca del lago de Atitlán, siendo la concentración de fósforo total el único parámetro que está por debajo del límite máximo permisible.

OBJETIVOS

General

Evaluar el transporte de nutrientes y materia orgánica a través del suelo y en el flujo de agua de las fosas de infiltración del sistema de tratamiento de agua residual de un beneficio húmedo de café.

Específicos

1. Analizar la calidad del agua contenida en las fosas de infiltración en diferentes períodos.
2. Analizar la calidad del agua infiltrada a diferentes profundidades y distancias.
3. Cuantificar la concentración del nitrógeno y sus especies en el suelo y en el agua de infiltración.
4. Cuantificar la concentración de fósforo total en el suelo y en el agua de infiltración.
5. Comparar la calidad del agua descargada con los límites máximos permisibles, para descarga en el subsuelo del artículo 13, Acuerdo Gubernativo 12-2011.

HIPÓTESIS

- **Hipótesis Estadística**

- **Nula (H₀):**

- * La concentración de los nutrientes y materia orgánica en el agua no varía significativamente entre los diferentes puntos de observación en función del tiempo.
- * La concentración de los nutrientes y materia orgánica en el suelo no varía significativamente entre los diferentes puntos de observación en función del tiempo.
- * La calidad del agua, a diferentes distancias de la laguna de infiltración, está por debajo de los límites máximos permisibles del artículo 13, Acuerdo Gubernativo 12-2011.

- **Alternativa (H_a):**

- * La concentración de los nutrientes y materia orgánica en el agua varía significativamente entre los diferentes puntos de observación en función del tiempo.
- * La concentración de los nutrientes y materia orgánica en el suelo varía significativamente entre los diferentes puntos de observación en función del tiempo.

- * La calidad del agua, a diferentes distancias de la laguna de infiltración, no está por debajo de los límites máximos permisibles del artículo 13, Acuerdo Gubernativo 12-2011.

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, el café guatemalteco ha alcanzado un reconocido posicionamiento en las exportaciones, asegurando su prestigio mediante el cuidadoso procesamiento del grano en beneficios húmedos. Éstos utilizan el agua para la clasificación secundaria, la fermentación, el despulpado, el lavado y clasificación final. El volumen de agua utilizado es inversamente proporcional al nivel de tecnificación y a la carga de los contaminantes en el agua residual.

Actualmente, el sistema de tratamiento convencional de agua residual de café, aguamiel, está basado en la separación de sólidos con tamices, tanques de sedimentación con adición de cal, filtración y fosas de infiltración. Estas fosas reciben el agua residual del proceso y permiten la infiltración de la misma al subsuelo, el cual funciona como un filtro. En la zona no saturada o vadosa ocurre la transformación de contaminantes mediante procesos químicos, físicos y biológicos.

Desde hace más de cien años el tratamiento del agua residual mediante infiltración-percolación, como tecnología de superficie, y sistemas de profundidad como el tratamiento suelo-acuífero se han utilizado en Francia y Alemania. Diversos mecanismos naturales, que aprovechan la zona no saturada o vadosa del suelo, se han desarrollado en Estados Unidos, España, Australia, entre otros. Al ser una recarga puntual las fosas de infiltración favorecen el flujo de agua y de sus constituyentes hacia la zona saturada.

Para conocer el comportamiento de los nutrientes y la materia orgánica en el suelo y en el flujo de agua de infiltración y su incidencia en cuerpos receptores se analizó el área de influencia de la infiltración del aguamiel contenida en la fosa No. 7, de una serie de 12 fosas en un beneficio húmedo de café ubicado en la Aldea San Antonio Chacayá, del municipio Santiago Atitlán, del departamento de Sololá, para ello se instalaron dos puntos de monitoreo ubicados a 1,50 y 3,00 metros de distancia desde la fosa, en donde se tomaron muestras de suelo y de agua a 3 diferentes profundidades, realizando las mediciones cada 7 días durante la infiltración del agua y cada 15 días durante el período de secado de la fosa.

Los resultados en la calidad del agua obtenidos se compararon con el Acuerdo Gubernativo 12-2011, el cual establece límites máximos permisibles para entes generadores, definiendo al subsuelo como cuerpo receptor. Con esta investigación se resolvieron interrogantes sobre la variación de la calidad del agua infiltrada a diferentes profundidades, determinando la transformación química y biológica del nitrógeno orgánico, del fósforo total, del potencial de hidrógeno y de la materia orgánica y su efecto en el suelo.

El interés de la Asociación Nacional del Café (ANACAFE) y el Ministerio de Recursos Naturales (MARN), por evaluar el funcionamiento de esta alternativa para el tratamiento de las aguas residuales pretende encontrar una solución técnica y económicamente viable para los caficultores del país.

1. ANTECEDENTES

En 1773 los sacerdotes jesuitas importan las primeras plantas de café a Guatemala. En 1803 el cacao, el azúcar, el algodón y el café son exonerados del impuesto de alcabala durante diez años. En 1835 se realiza la primera cosecha de cien quintales de café logrando, en 1854, realizar la primera exportación consistente en 95 quintales oro a un valor de 10 dólares cada uno.

En 1960 es creada la Asociación Nacional del Café, ANACAFE, la cual ha promovido los más altos estándares en cada aspecto de la producción del grano, respecto a su fortalecimiento local y para exportaciones.

En 1971, el científico Charles Weiss, Universidad de Carolina del Norte, Estados Unidos, entrega a la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria –ERIS– un informe sobre el desarrollo de la cianobacteria en el lago de Atitlán y las medidas preventivas a aplicar, para evitar su florecimiento.

En Inglaterra, en 1985, la Asociación Internacional de Hidrólogos presenta estudios sobre la zona no saturada como barrera a la contaminación de las aguas subterráneas por residuos peligrosos.

Cobas, Domingo y Romanovski, Olga realizaron un estudio del impacto de los residuales del beneficio húmedo del café en la provincia Guantánamo, Cuba, estableciendo el impacto en suelos.

En 1998, ANACAFE elabora estudios sobre el análisis del agua de abastecimiento, descarga y cuerpo receptor en beneficios tradicionales, semitecnificados y tecnificados, identificando la concentración de parámetros de interés y realizando un análisis comparativo entre la descarga indirecta, fosas de infiltración y descarga directa en cuerpos receptores. Se reportan los efectos indirectos de aguas mieles contenidas en fosas de absorción y en un cuerpo de agua que pasa a una distancia lineal de 20 metros del sitio donde se ubica la fosa. Los resultados muestran que al descargar las aguas contaminadas del beneficio húmedo de café hacia una fosa, ubicada a una distancia mínima de 20 metros no hay contaminación en los cuerpos cercanos.

A finales del 2009 es reportado el florecimiento de la cianobacteria en el lago de Atitlán, las causas pueden ser movimientos de tierra, actividad agrícola y descarga de aguas residuales. Se inician esfuerzos entre la autoridad para el manejo sustentable para la Cuenca del lago de Atitlán y su entorno (AMSCLAE), Universidad de California Davis, Centro de Estudios Atitlán y el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN).

2. MARCO TEÓRICO

2.1. El suelo

El suelo es una capa dinámica, en la que tienen lugar numerosos y complejos procesos físicos, químicos y biológicos, está constituido por partículas minerales y orgánicas.

2.1.1. Horizontes

Los horizontes o capas del suelo son una serie de niveles horizontales que se desarrollan en el interior del mismo y que presentan diferentes características de composición, textura, adherencia, etc. Los horizontes genéticos son aquellos que resultan de la edafogénesis y se denominan de la siguiente forma:

- Horizonte O: horizonte orgánico de un suelo mineral
- Horizonte A: es el suelo superficial o superior en el cual la materia viva es abundante y existe una mayor cantidad de materia orgánica que le da una coloración oscura. Por lo general, en suelos minerales el suelo es terroso y rico en humus. En este horizonte se da una mayor lixiviación que en las capas inferiores.
- Horizonte B: éste comprende el subsuelo, nivel medio, y se compone principalmente de material padre entrelazado con raíces y microorganismos.

Existe un mayor contenido de óxidos de hierro y aluminio; así como humus o arcilla lixiviados del horizonte A. Puede formarse debido a procesos de alteración por efecto del clima o del tiempo, por acumulación de arcilla o materia orgánica mediante iluviación, o por la translocación de carbonato de calcio o yeso.

- Horizonte C: esta capa se forma de roca no consolidada y una amplia gama de piedras de diversos tamaños, debajo se encuentra la roca madre consolidada.
- Horizonte D o R: capa formada por material rocoso que no ha sufrido alteraciones químicas o físicas.

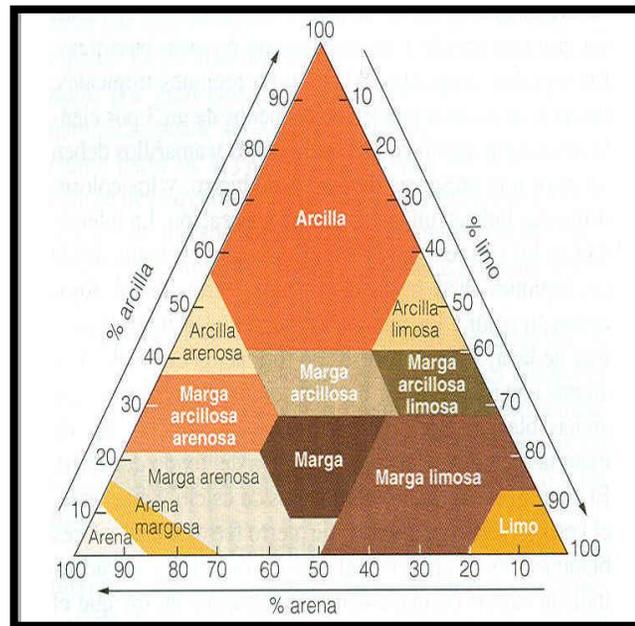
2.1.2. Propiedades físicas del suelo

Las propiedades físicas del suelo influyen directamente en la capacidad de uso del suelo, delimitando la penetración de las raíces, la aireación, la capacidad de drenaje y de almacenamiento de agua y, la retención de nutrientes. Al conocerlas es posible comprender en qué medida influirán en el equilibrio dinámico entre el suelo y los cultivos.

2.1.2.1. Textura

Representa la composición granulométrica del suelo según el tamaño de la partícula en función de la composición cuantitativa de arcilla, limo y arena. La fracción porcentual de cada tipo de textura se define gráficamente en un diagrama triangular, figura 1, que representa los valores de las tres fracciones, a cada combinación se le llama: término textural.

Figura 1. Diagrama triangular para determinación de textura del suelo



Fuente: GLIESSMAN, Stephen. Agroecología. p. 106.

La granulometría incide en la mayoría de las propiedades físicas, químicas y biológicas, por ejemplo: estructura, color, consistencia, porosidad, permeabilidad, retención de agua, lixiviación, capacidad de intercambio, reserva de nutrientes.

- Suelo arcilloso: tienen un tamaño de partícula menor a 0,002 mm, tienen buena estructura y son muy ricos en nutrientes. Químicamente son muy activos, absorben iones y moléculas, flocculan y dispersan. Son impermeables y asfixiantes, pero tienen la capacidad de retener mucha agua.

- Suelo limoso: el tamaño de las partículas varía de 0,002 a 0,05 mm y su estructuración es casi nula, por lo que no tienen propiedades coloidales. Son impermeables y tienen mala aireación.
- Suelo arenoso: el tamaño de las partículas varía de 0,05 a 2,0 mm. Son inertes desde el punto de vista químico, carecen de propiedades coloidales y de reserva de nutrientes. Presentan mala estructuración, buena aireación, su permeabilidad es muy alta por lo que retienen poca agua.

2.1.2.2. Porosidad

Se define como el cociente entre el volumen de poros de una muestra y su volumen total aparente, relaciona la cantidad de poros que tiene un suelo y el volumen relativo que ocupan. Indica la permeabilidad hidráulica y gaseosa del suelo. Una porosidad relativamente alta permea más agua. Los valores medios para suelos se sitúan entre 40 y 60%.

Para obtener el porcentaje de porosidad se calcula la proporción del volumen de poros entre el volumen total, multiplicada por cien.

2.1.2.3. Permeabilidad

Indica la cantidad de agua que puede pasar en el suelo en función del tiempo, representando así la facilidad de circulación o retención del agua en el mismo.

Depende fundamentalmente de la textura y estructura del suelo, por ejemplo: suelos muy permeables presentan valores en decímetros por hora, suelos permeables en centímetro por hora, y suelos poco permeables en milímetros por hora. Puede evaluarse a través de la velocidad de infiltración la cual varía en función del contenido de humedad.

2.1.2.4. Contenido de humedad

Es el volumen del suelo ocupado por agua y se define como la proporción entre el volumen ocupado por agua dividido en el volumen total de la fracción de suelo analizada.

$$\text{Contenido de humedad} = \frac{\text{Volumen ocupado por agua}}{\text{Volumen total}}$$

El contenido de humedad en el suelo se puede cuantificar a través del perfil vertical de un terreno, en el cual se identifican los diferentes niveles de humedad. En él, los flujos de humedad no son constantes de un horizonte a otro debido a la continua actividad por debajo y por encima de la superficie. Cuando el contenido de humedad es igual a la porosidad se dice que el suelo está saturado, este grado de saturación varía en el tiempo y el espacio.

2.1.3. Química del suelo

La composición química del suelo varía con el tiempo, mediante diferentes procesos químicos, físicos y climatológicos.

2.1.3.1. Meteorización

Consiste en el proceso de variación del suelo debido a la presencia de agua. La meteorización física implica sólo la desintegración o pulverización de la roca madre mediante la disminución del tamaño de las partículas.

La meteorización biológica es la descomposición de rocas por acción de los microorganismos, puede ser de carácter físico o químico. La meteorización química comprende una primera fase de descomposición química de los minerales primarios de partículas grandes, arena y limo, de rocas ígneas y metamórficas; la segunda fase implica la síntesis de minerales secundarios provenientes de partículas coloidales, arcilla y óxidos.

En este tipo de meteorización se dan procesos de disolución de sales, hidrólisis y oxidación. Puede verse acelerada debido a la descomposición de silicatos y óxidos de hierro y aluminio. En presencia de aire éstos dan lugar a la oxidación de otras sustancias químicas más solubles.

2.1.3.2. Acidez del suelo

El rango óptimo del potencial de hidrógeno (pH) para los cultivos de café se encuentra entre 5,5 a 6,5 unidades. Suelos con pH menor a 5,5 son ácidos, hecho que impacta fuertemente a los microorganismos simbióticos de la fijación de nitrógeno y genera dificultad en la planta para la absorción de nutrientes. La acidificación del suelo se puede dar debido a la pérdida de bases por la lixiviación, a la producción de ácidos orgánicos de las raíces de las plantas y microorganismos y a la extracción de iones de los nutrientes por las plantas en suelos con poca capacidad de amortiguamiento.

2.1.3.3. Capacidad de intercambio catiónico

El intercambio catiónico busca el equilibrio del complejo coloidal del suelo, cargado electrostáticamente, con los iones de la fase acuosa mediante procesos reversibles en los cuales los iones de la fase acuosa son adsorbidos por las partículas sólidas del suelo cargadas negativamente (arcillas, hidróxidos y materia orgánica) y liberan una cantidad equivalente de otros cationes.

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) es la cantidad de sitios disponibles en las estructuras laminares, micelas, formadas en partículas de arcilla y humus, capaces de retener iones positivos más pequeños y móviles.

Valores altos de CIC, indican mayor capacidad para retener o intercambiar cationes, previniendo la lixiviación de los nutrientes. Las micelas absorben los iones negativos, como nitratos, fosfatos y sulfatos, mediante la formación de puentes provenientes de la asociación de ion hidrógeno con grupos funcionales como el ion hidroxilo, suceso que está controlado por la acidez del suelo.

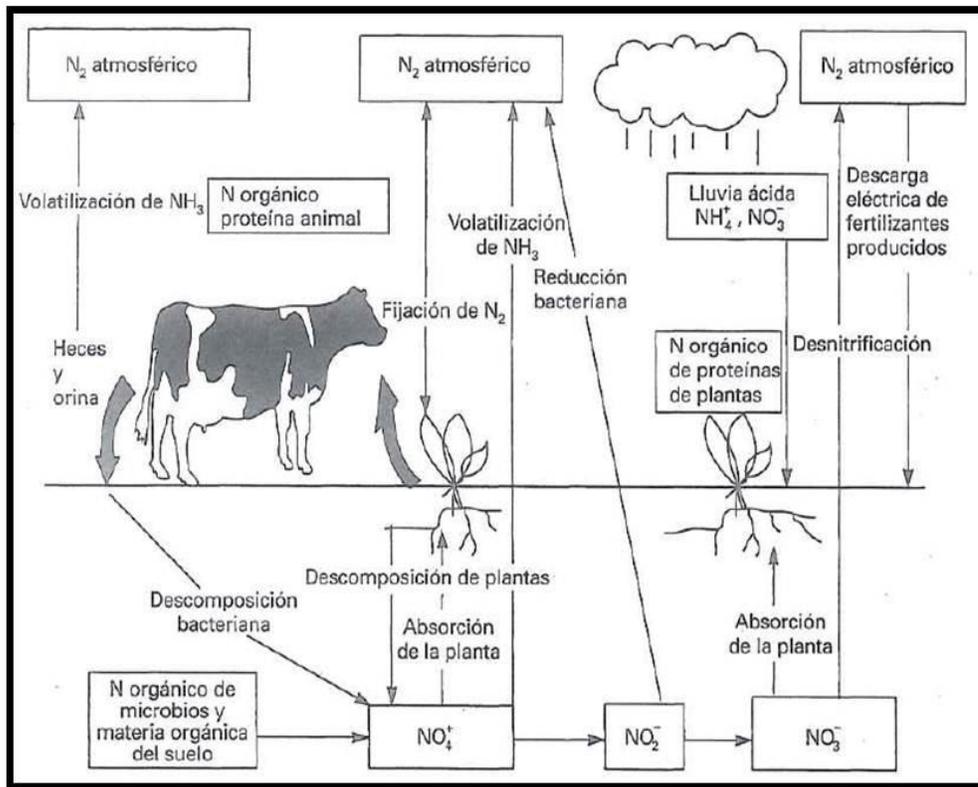
2.1.3.4. Nutrientes

Los nutrientes vegetales son aquellos elementos químicos necesarios para el desarrollo de las plantas, que pueden ser absorbidos del suelo a través de las raíces o del aire mediante las hojas. Entre los nutrientes esenciales necesarios para el adecuado crecimiento y maduración de la planta, el carbono, el oxígeno y el hidrógeno ocupan la mayor parte del peso seco de las plantas. El nitrógeno, fósforo y potasio son macronutrientes y deben ser suministrados. A continuación se describen el comportamiento del nitrógeno y el fósforo en el suelo y su relación con las plantas.

- Nitrógeno

El nitrógeno es absorbido por las plantas a través de las raíces en forma de amonio (NH_4^+) y de nitrato (NO_3^-); más del 95% del nitrógeno del suelo está en forma de materia orgánica. Debido a que estimula el crecimiento rápido; favorece la síntesis de clorofila, de aminoácidos y de proteínas, aumenta la producción de follaje y frutos. Su disponibilidad depende del equilibrio entre mineralización e inmovilización.

Figura 2. Diagrama del ciclo del nitrógeno



Fuente: KIELY, Gerard. Ingeniería Ambiental. p. 571.

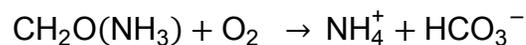
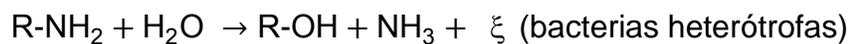
- Mineralización

Los compuestos orgánicos, provenientes de restos vegetales y animales destruidos, son descompuestos por los microorganismos, los cuales utilizando sus jugos digestivos y enzimas liberan minerales y dióxido de carbono. En este proceso ocurre la conversión del nitrógeno orgánico en nitrógeno mineral, ya sea por aminización, amonificación o nitrificación; el proceso inverso es la inmovilización.

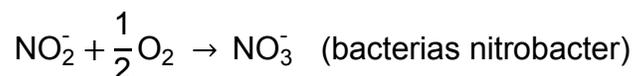
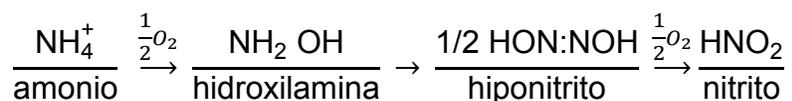
- * Aminización: hidrólisis enzimática de proteínas a aminas y aminoácidos. Por acción de bacterias heterótrofas.



- * Amonificación: hidrólisis enzimática de aminas y aminoácidos a amoníaco.



- * Nitrificación: de nitrógeno de amonio a nitrógeno de nitratos.



2.1.3.5. Poder depurador de materiales

El poder depurador de los materiales que constituyen el suelo, está definido por las características granulométricas, mineralógicas y edafológicas del suelo. La depuración de las aguas ocurre mediante procesos físicos, filtración, absorción; químicos, hidrólisis, óxido-reducción, disolución de sales y procesos microbiológicos; desnitrificación, fermentación.

2.2. Procesos hidrológicos

Los procesos de circulación del agua en la hidrósfera se pueden comprender a través del estudio del ciclo hidrológico.

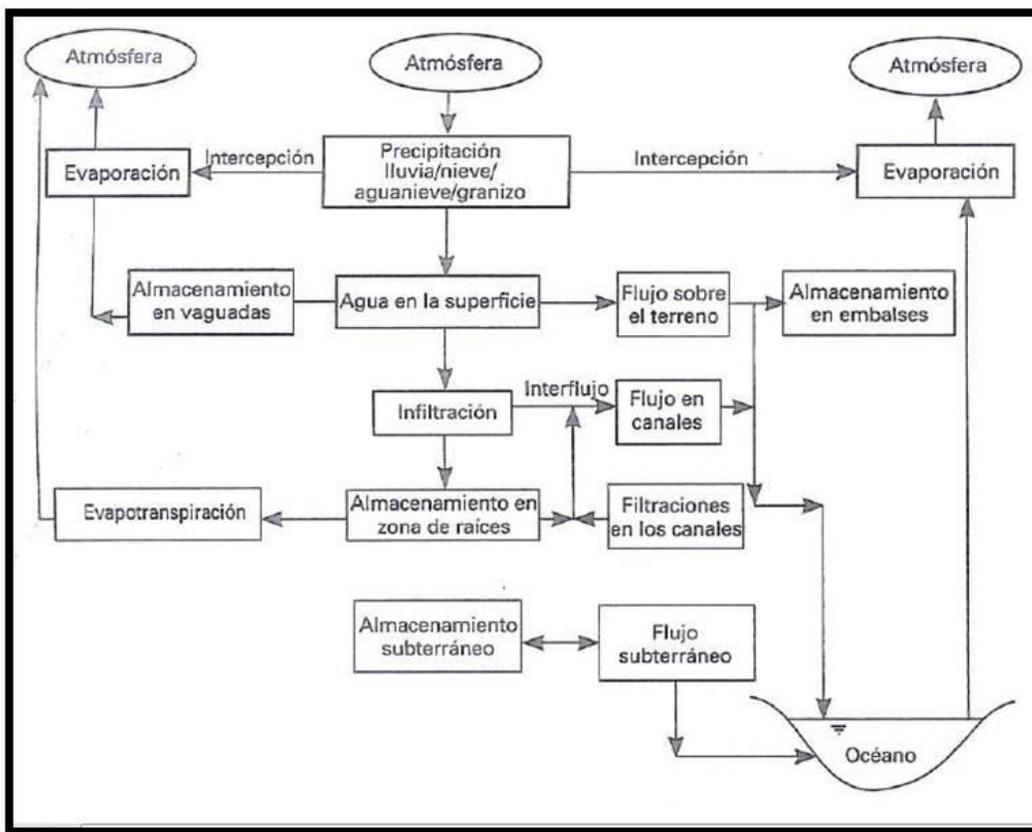
2.2.1. Ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico es el movimiento continuo del agua en sus diferentes estados físico y en los diferentes componentes del planeta, a continuación se describen brevemente algunos de ellos.

- **Precipitación:** es la entrada del agua al ciclo hidrológico puede ser en forma de lluvia, granizo o nieve. El análisis de esta aportación implica determinar el área, la altura, la frecuencia, la duración y la intensidad. Una parte de la precipitación se transporta superficialmente a través de la escorrentía y la otra entra al suelo a través de la infiltración.
- **Evaporación:** a través de este proceso el agua, en estado vapor, retorna a la atmósfera desde el estado líquido o gaseoso. Cuando el agua en estado vapor proviene de la transpiración de las plantas y árboles se le llama evapotranspiración.

- **Infiltración:** es el proceso de entrada del agua desde la superficie del suelo hacia el suelo. Está influenciada por la condición superficial del suelo, sus propiedades, cobertura vegetal y la superposición de estratos (horizontes) los cuales influyen en las variaciones espaciales y temporales en el flujo de agua hacia el suelo. En la figura 4 es posible identificar los diferentes aportes del agua a los componentes del ciclo hidrológico.

Figura 4. **Componentes del ciclo hidrológico**



Fuente: KIELY, Gerard. Ingeniería Ambiental. p. 202.

2.2.2. Flujo de agua en el subsuelo

En hidrología ambiental existen dos zonas que están por encima del lecho de roca y que pueden contener y transmitir agua en función de los siguientes factores: textura, porosidad, estructura, conductividad hidráulica del suelo y la humedad del mismo.

2.2.2.1. Zona no saturada

Es la franja del terreno que se sitúa entre la superficie y el acuífero, es también llamada zona vadosa y debido a sus condiciones físicas, químicas y biológicas se dan procesos de transferencia de masa y de energía entre la atmósfera y las aguas subterráneas.

El agua bajo la superficie del terreno puede fluir en las direcciones espaciales, x, y, z y la forma en que lo hará está definida por el tipo de suelo y el estado de humedad. Si el estado de humedad está próximo al de la capacidad de campo, la dirección del movimiento será horizontal, ocurriendo habitualmente a lo largo del gradiente de la línea superior de agua, que puede seguir la pendiente de inclinación del terreno.

2.2.2.2. Zona saturada

Es la zona que está por debajo del nivel piezométrico y donde los poros o espacios vacíos del suelo están totalmente llenos de agua, siendo un parámetro importante en el movimiento del agua la conductividad hidráulica, es decir, la velocidad de movimiento del agua.

2.3. El café

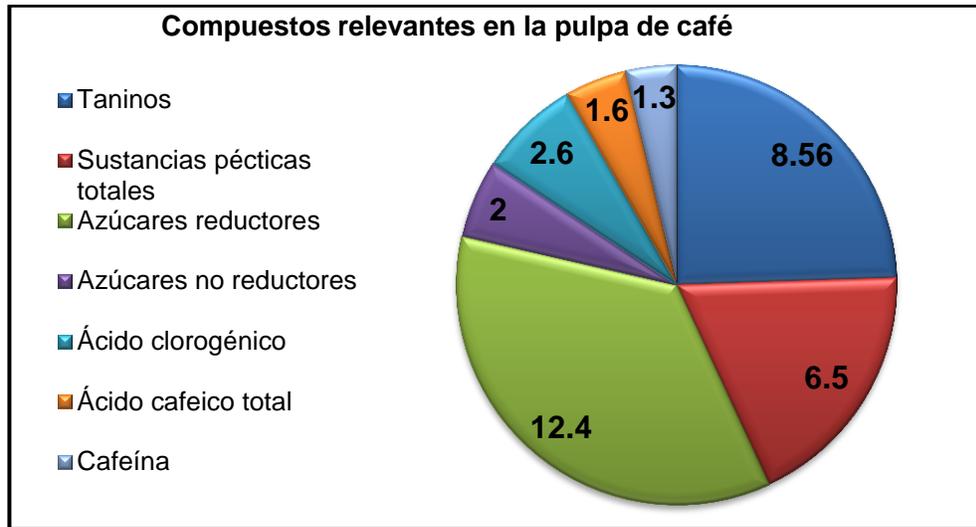
La composición química del café y su procesamiento para la obtención del grano seco, permiten comprender la importancia de los subproductos generados para su aprovechamiento y en el tratamiento de las aguas residuales.

2.3.1. Frutos del café y su composición química

Bressani, Ricardo en su publicación *Composición química de la pulpa del café y otros subproductos*, indica que los frutos de café están compuestos por pulpa de café, mucílago y café pergamino de la siguiente forma, en 65.98 por ciento de base húmeda:

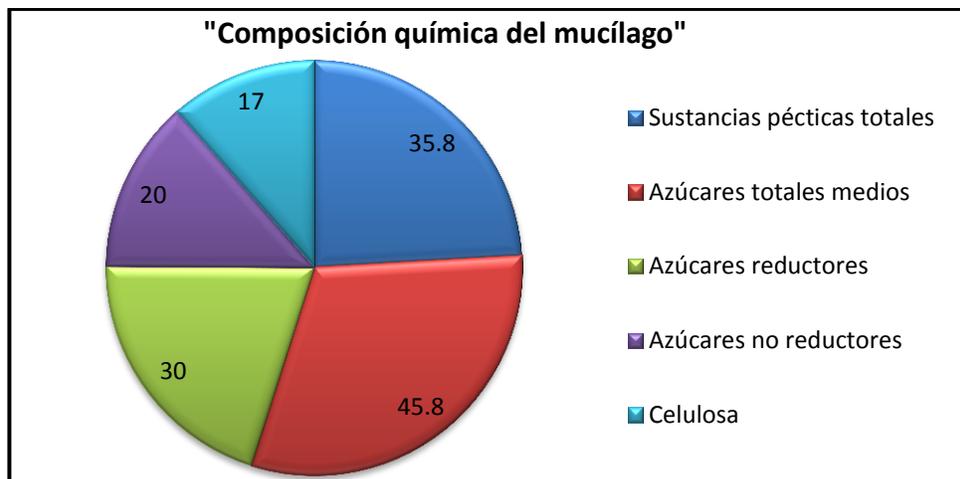
- Pulpa de café: corresponde al 40,6 % en peso del fruto de café, tiene elevado porcentaje de fibra y su proteína contiene niveles altos de aminoácidos y lisina. Algunos de los compuestos importantes se observan en la figura 5.
- Mucílago: es una solución coloidal localizada entre la pulpa y la cáscara del grano de café. Este material representa alrededor del 5% del peso seco y contiene agua, pectinas, azúcares y ácidos orgánicos. Durante la maduración del grano de café el pectato de calcio es convertido en pectinas. En la figura 6 es posible observar la composición química del mucílago, en tanto por ciento.

Figura 5. **Compuestos relevantes en la pulpa de café**



Fuente: BRESSANI, Ricardo. Composición química de los subproductos del café. p 13.

Figura 6. **Composición química porcentual del mucílago**



Fuente: BRESSANI, Ricardo. Composición química de los subproductos del café. p 13.

- Pergamino de café: es la cascarilla que envuelve al grano, se encuentra después de la capa mucilaginosa, y representa alrededor de 12% del grano de café de base seca. El contenido de extracto libre de nitrógeno del pergamino del café es de 0,0189 kg.

2.3.2. Beneficio húmedo de café

El procesamiento del café para la obtención del grano seco libre de mucílago y pulpa, se realiza en beneficios húmedos con un considerable consumo de agua. Según la revisión del 2011, realizada por ANACAFE, existen 2396 beneficios en el país.

2.3.2.1. Etapas del proceso

Las etapas en el procesamiento del café además de influir en la calidad del producto, son puntos clave en la generación de subproductos que pueden ser fácilmente tratados y utilizados debido a que son fuente de nutrientes y materia orgánica.

- Clasificación: el café se recibe y clasifica por medio de tanques con agua bajo el principio de vasos comunicantes (sifón), con capacidad promedio de 40 a 50 m³ de volumen de agua. Estos depósitos requieren un caudal constante de agua a manera de mantener su volumen y poder así clasificar el café maduro por medio del principio de flotación o densidad.

Se realiza una segunda clasificación, en la cual se separan los granos de menor densidad por medio de un sistema de cribado mecánico. Estos granos son defectuosos en su mayoría, debido a plagas o enfermedades.

- Remoción de la pulpa: el despulpado consiste en eliminar la cáscara o pulpa del grano de café, facilitado por la acción lubricante de la miel o mucílago que envuelve al grano con su pergamino. Se utilizan grandes cantidades de agua para el despulpado, así como el transporte de la pulpa. En algunos casos la pulpa es almacenada en fosas, separando previamente el agua.
- Clasificación del café despulpado: esta fase se realiza, utilizando zarandas oscilantes y/o depósitos con agua, para provocar la clasificación del grano por tamaño y por densidad. El objetivo es separar granos con pulpa adherida, granos verdes, granos pequeños que por su tamaño y consistencia pasan en los pulperos, pero no en las zarandas, ni en las cribas. Este fruto va al pulpero separador, en donde es posible rescatar granos de primera calidad.
- Fermentación: el mucílago del café se somete a una fermentación natural a manera de degradarlo y lograr la separación del grano, esta etapa se lleva a cabo en tanques rectangulares de concreto y el tiempo de retención en estos tanques dependerá de factores ambientales tales como temperatura y altitud.
- Lavado y clasificación final: después de la fermentación del mucílago, la siguiente etapa consiste en adicionar agua limpia al proceso con la finalidad de eliminar el mucílago fermentado, de igual manera para la clasificación por densidad del grano en un canal de corretero, dicha operación se realiza en forma manual.

2.3.2.2. Agua de abastecimiento y descarga

Las aguas de descarga directa del beneficio tradicional presenta un valor promedio de 7953 mg/L y las aguas de descarga indirecta de los beneficios semitecnificados y tecnificados concentran mayor carga contaminante porque operan recirculación de agua, reduciendo el volumen de agua del 50 al 90% en relación al beneficio tradicional.

El proceso de beneficiado húmedo de café acidifica el agua; sin embargo, el café se cultiva en suelos ligeramente ácidos. Considerando el efecto químico de las aguas servidas de los beneficios húmedos de café actualmente se hace necesario verter las mismas como descarga indirecta hacia una fosa donde se degradan, infiltran y se evaporan.

- Caudal: el cálculo de los caudales máximos de entrada y salida se basa en la entrada máxima diaria de café maduro al beneficio. El consumo de agua es inversamente proporcional al nivel de tecnificación en el procesamiento del café.

Figura 7. **Estimación de caudales máximos (litros diarios)**

PRODUCCIÓN ANUAL QUINTALES PERGAMINO	MÁXIMA ENTRADA DIARIA QUINTALES CEREZA	B. TRADICIONAL		B. SEMITECNIFICADO		B. TECNIFICADO	
		CAUDAL		CAUDAL		CAUDAL	
		ENTRADA	SALIDA	ENTRADA	SALIDA	ENTRADA	SALIDA
500	50	20000	20000	10000	10000	1200	1200
1000	100	40000	40000	20000	20000	2400	2400
2000	200	80000	80000	40000	40000	4800	4800

Fuente: Seminario regional de consulta sobre situación actual del beneficiado de café: revisión y avances tecnológicos del proceso. p 14.

2.4. Agua residual

Es el tipo de agua de desecho que resulta del uso del agua con fines domésticos o industrial; se denominan residuales debido a que deben ser tratadas mediante sistemas con diferentes etapas, para poder ser nuevamente utilizadas sin riesgo de contaminación.

2.4.1. Caracterización de aguas residuales

La caracterización de aguas residuales implica evaluar parámetros que sean potencialmente dañinos para la salud de la población y los ecosistemas.

2.4.1.1. Parámetros fisicoquímicos

- Potencial de hidrógeno

La química de los acuíferos se amortigua por la presencia de minerales calcáreos donde la acidez es neutralizada con la disolución de iones de calcio, magnesio y bicarbonato.

La acidez influye directamente en los procesos de oxidación-reducción, los cuales son importantes para el control de la solubilidad y estabilidad de muchos elementos que fácilmente ganan o pierden electrones: hierro, manganeso, nitrógeno, sulfuro, arsénico y muchos otros.

2.4.1.2. Nutrientes

Los nutrientes de mayor importancia son el nitrógeno y fósforo total, debido a que son los principales promotores en el crecimiento de bacterias, algas y plantas dentro del agua.

- **Nitrógeno**

El nitrógeno en aguas residuales se encuentra, principalmente, en forma de materia orgánica y amoníaco. Después de la descarga del efluente a la infiltración en el suelo, las bacterias aeróbicas en la zona no saturada convierten el amoniaco casi en su totalidad a nitrito y luego a nitrato.

El nitrógeno de nitrato es un contaminante de las aguas subterráneas, debido a que puede incidir directamente en la población mediante ingesta o en las propiedades del ecosistema acuático.

El nitrógeno, al ser un importante nutriente para las plantas, puede favorecer la eutrofización mediante el crecimiento excesivo de algas, esto conlleva un bloqueo de la luz solar que crea floraciones de algas nocivas que al morir son descompuestas por las bacterias, agotando el oxígeno disuelto disponible en las aguas superficiales y afectando las condiciones de degradación.

- **Fósforo**

El recorrido de fósforo de los sistemas de infiltración del subsuelo no se puede predecir simplemente por la capacidad de retención del mismo.

2.4.1.3. Parámetros relacionados con la biodegradabilidad

Son los parámetros degradados a su forma más simple, debido a la acción de los microorganismos sobre ellos.

- Demanda bioquímica de oxígeno

Es la concentración de oxígeno disuelto consumido por los microorganismos, presentes en el agua o añadidos a ella para efectuar la medición de la oxidación de toda la materia orgánica presente en la muestra de agua.

- Sólidos suspendidos totales

Indica el contenido combinado de todas las sustancias inorgánicas y orgánicas contenidas en un líquido que están presentes en forma suspendida, ya sea molecular, ionizado o micro-granular (coloidal solenoide).

2.4.2. Composición química de las aguas residuales del café

El agua residual del café, aguamiel, es biodegradable casi en su totalidad durante la digestión anaerobia, etapa en la cual ocurre la acidogénesis y metonogénesis del jugo de pulpa. Los integrantes fundamentales de la DQO del agua de pulpa son azúcares y proteínas, así como pequeñas cantidades de cafeína, taninos y ácido clorogénico.

Los taninos y el ácido clorogénico son los responsables de la coloración. El agua miel contiene básicamente ácidos orgánicos simples de pectina y azúcares provenientes del mucílago.

- Agua proveniente del lavado de pulpa

El agua de pulpa de café contiene algunos compuestos tóxicos. Tres componentes naturales de la pulpa son toxinas potenciales: la cafeína, el ácido clorogénico y los taninos. El ácido clorogénico es adaptable, la cafeína en determinadas circunstancias no es tóxica y los taninos inhiben el 50% de la metanogénesis; la digestión del agua miel debe hacerse con una concentración de DQO inferior a 7 kg/m^3 .

En el caso de aguas de despulpado se encuentra del 40 al 50% de azúcares, aproximadamente 25 por ciento de taninos y ácido clorogénico y entre un 15 al 20 por ciento de cafeína. La digestión del agua miel debe hacerse con una concentración de DQO de 3 a 5 kg/m^3 .

2.4.3. Sistemas de tratamiento de agua residual

Un sistema de tratamiento de agua residual es un conjunto de procesos físicos, químicos y/o biológicos que tiene como objetivo tratar el agua residual hasta valores iguales o menores del cuerpo receptor.

2.4.3.1. Niveles de tratamiento

Los niveles de tratamiento son el conjunto de procedimientos que utilizan operaciones unitarias en común para el tratamiento de aguas residuales, tienen un fin específico y pueden ser: preliminar, primario, secundario, y terciario.

- Tratamiento preliminar

Su fin es la remoción de material inerte, material flotante y de material sólido de gran tamaño. Está compuesto por: Rejas de cribas o de barras, desarenador, desangrasador, neutralización.

- Tratamiento primario

En este tratamiento se espera la separación de material sedimentable, lodos, para ser tratados con procesos diferentes. Pretende remover aceites, grasas, arenas y sólidos gruesos para generar las condiciones adecuadas del efluente para que pueda ser tratado biológicamente.

- Tratamiento secundario

Tiene como fin, remover material coloidal y en suspensión, utilizando procesos biológicos que aprovechan la acción de los microorganismos presentes en las aguas residuales, para degradar la materia orgánica a materia celular, productos inorgánicos o material inerte. Conlleva el tratamiento con:

- Microorganismos fijos: filtro anaerobio, reactor tubular de película fija, filtros percoladores, biodiscos.
- Microorganismos suspendidos: lagunas aerobias, lagunas anaerobias, lagunas facultativas, lagunas aireadas, lodos activados.

- Tratamiento terciario

Pretende eliminar la carga orgánica residual y otras sustancias contaminantes para alcanzar una calidad físico-química y/o biológica adecuada. Según la calidad del cuerpo receptor, generalmente se busca remover nutrientes, nitrógeno y fósforo, y microorganismos patógenos.

- Tratamiento biológico

Su fin es descomponer compuestos orgánicos peligrosos en no peligrosos, mediante la acción de microorganismos. La eficacia de este tratamiento *in situ* es determinada por la hidrología del sitio, las condiciones ambientales y la biodegradabilidad de los contaminantes. La calidad del agua infiltrada hacia un acuífero, se ve afectada por el desarrollo químico por interacción con los estratos del subsuelo. La concentración de sólidos totales disueltos y algunos iones importantes, aumentan con el tiempo de flujo, con la profundidad y con el área de descarga natural al acuífero.

2.4.3.2. Tratamiento de agua residual del café

La pulpa es transportada hidráulicamente hacia fosas de infiltración, en donde puede separarse el agua que sirve como vehículo de la pulpa y verterla hacia zanjones naturales, dentro de las fincas. El caso extremo a evitar, es que ambos subproductos vayan directamente hacia el cuerpo receptor. El agua proveniente del proceso de lavado y clasificación es generalmente, canalizada con el agua de despulpado. En el caso de los beneficios tradicionales la carga contaminante se reduce por dilución, debido a los altos volúmenes de agua utilizada en el proceso.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

Como resultado de la revisión bibliográfica de los métodos establecidos para el análisis del agua en el subsuelo procedente de una recarga puntual, fosa de infiltración, y para alcanzar los objetivos se presentan factores que influyen en la determinación de las variables respuesta.

3.1.1. Variables de control

En la tabla I se definen las variables del ambiente externo, que influyen en el análisis del suelo y del agua, clasificando cada una como factor perturbador controlable o de ruido.

Tabla I. **Análisis del ambiente externo**

No.	Variable	Dimensional	Factores perturbadores	
			Controlable	Ruido
1	Constante de permeabilidad	cm/h		X
2	Temperatura ambiente	°C		X
3	Humedad relativa	%		X
4	Dirección del viento	km/hr		X
5	Evapotranspiración	m/día		X
6	Precipitación pluvial	m/día		X

Fuente: elaboración propia.

En la tabla II se definen las variables de control implicadas en el análisis de la calidad del agua y del suelo

Tabla II. **Definición operacional de las variables de control**

No.	Variable	Dimensional	Factor potencial de diseño	
			Constantes	Variables
Agua				
1	Volumen de muestra	m ³	X	
2	Temperatura	°C		X
3	Tiempo	día	X	
4	Potencial de hidrógeno	Ph		X
5	Nitrógeno total	kg/m ³		X
6	Fósforo total	kg/m ³		X
7	Demanda bioquímica de oxígeno	kg/m ³		X
9	Sólidos totales suspendidos	kg/m ³		X
Suelo				
1	Volumen de muestra	m ³	X	
2	Tiempo	dia	X	
3	Potencial de hidrógeno	pH		X
4	Porcentaje de nitrógeno total	%		X
5	Concentración de amonios y nitratos	kg/m ³		X
6	Porcentaje de fósforo disponible	%		X
7	Contenido de materia orgánica	kg/m ³		X
8	Capacidad de intercambio catiónico	cmol/m ³		X

Fuente: elaboración propia.

3.1.2. Variables respuesta

La evaluación del transporte de los nutrientes y materia orgánica se realizó mediante el análisis de las siguientes variables respuesta presentadas en la tabla III. Asimismo, se analizaron el potencial de hidrógeno y los sólidos totales suspendidos, para conocer la interacción del agua con los diferentes estratos.

Tabla III. Definición operacional de las variables respuesta

No.	Variable	Dimensional
1	Potencial ácido	pH
2	Concentración de nitrógeno total	mg/L
3	Concentración de fósforo total	mg/L
4	Demanda bioquímica de oxígeno	mg/L
5	Sólidos totales suspendidos	mg/L

Fuente: elaboración propia.

3.2. Delimitación del campo de estudio

- Área: calidad del agua.
- Proceso: sistemas de tratamiento de aguas residuales.
- Etapa del proceso: tratamiento secundario
- Ubicación: el monitoreo se realizó en un beneficio húmedo de café de la Aldea San Antonio Chacayá, municipio de Santiago Atitlán, Sololá.

- Análisis de muestras: el análisis de la calidad del suelo se realizó en el laboratorio de suelos, plantas y aguas de ANACAFE (ANALAB) y el análisis de agua en el laboratorio de análisis químico y ambiental (LIQA) de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia de la Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Clima: el municipio de Santiago Atitlán posee una precipitación pluvial de 2895,9 mm., con un clima, generalmente, alrededor de los 20 °C.

3.2.1. Tipo de estudio

Metodología de investigación descriptiva acerca del funcionamiento de la fosa de infiltración de aguas mieles de un beneficio húmedo de café.

3.2.2. Población de estudio

El área de influencia de la fosa de infiltración de aguas mieles del beneficio húmedo de café ubicado en la aldea San Antonio Chacayá, municipio de Santiago Atitlán, Sololá, a través del análisis de suelo y agua.

3.3. Recursos humanos

- Investigadora: Doris Yuritza Vega Montenegro
- Asesor: Ingeniero Químico José Mael Tay
- Apoyo técnico: Ingeniero Agrónomo Roberto Soto

3.4. Recursos materiales

A continuación se listan los recursos materiales utilizados para el análisis y toma de muestras, tanto de suelo como de agua.

3.4.1. Análisis de muestras

El análisis de las muestras estuvo conformado por la medición de parámetros in situ tales como: pH y temperatura; y por la recolección de las muestras de suelo y agua para enviarlas a los respectivos laboratorios.

3.4.1.1. Equipo de medición en campo

Potenciómetro portátil marca HACH, sonda para medición de temperatura y potencial de hidrógeno, solución buffer pH 4, solución buffer pH 7, piseta, libreta de campo y marcador de tinta china.

3.4.1.2. Toma de muestras de agua

Hielo y hieleras para transporte de muestras, recipientes plásticos AGRIN con capacidad de 1 litro para toma de muestra, etiquetas, guantes de látex y papel para secar.

3.4.1.3. Toma de muestras de suelo

Bolsas de papel kraft para muestra de suelo, caja plástica, parafina, recipiente, estufa eléctrica, caba, machete, pala y escalera.

3.4.2. Monitoreo

Para identificar el transporte de los compuestos de interés se eligieron dos puntos de monitoreo a una distancia horizontal de 1,5 y 3 metros, a lo largo de la inclinación del terreno, en cada punto se tomaron muestras de agua y suelo a las profundidades establecidas.

3.4.2.1. Periodicidad

- Muestreo de agua

El monitoreo del comportamiento del agua incluyó un muestreo completo en la fosa de infiltración, a 1,5 y a 3,0 metros de distancia horizontal, así como a tres diferentes profundidades: 1,50, 2,25 y 3,00 metros. Los tiempos y la frecuencia del monitoreo se resumen en la tabla IV.

Tabla IV. Frecuencia del monitoreo del agua

Tiempo (días)	Fosa de infiltración	Punto de monitoreo				Total de muestras
		1	2	3	5	
1	2	1	1	1	1	6
8	2	1	1	1	1	6
15	1	1	1	1	1	5
22	1	1	1	0	1	4
29	1	1	1	0	1	4
29 - 78	5	3	1	0	0	9
Total	12	8	6	3	5	34

Fuente: elaboración propia.

Los puntos de monitoreo 1, 2, 3 y 4 se ubicaron a 1,50 m de distancia desde la fosa de infiltración, a 1,00, 1,50, 2,25 y 3,00 m de profundidad respectivamente. Los puntos de monitoreo 5, 6 y 7 se ubicaron a 3,00 m de distancia, a 1,50 m, 2,25 y 3,00 m de profundidad respectivamente.

- Muestreo de suelo

Para considerar el efecto de la infiltración del agua en el suelo se analizó la concentración de nutrientes y de materia orgánica, la ubicación y frecuencia de muestreo se realizó como se describe en la tabla V.

Tabla V. **Frecuencia del monitoreo del suelo**

Tiempo (días)	Fosa de infiltración	Distancia			Total de muestras
		1,50 m	3,00 m	testigo	
1	2	4	4	5	15
30	2	4	4	0	10
90	2	4	4	5	15
105	2	4	4	5	15
120	2	4	4	5	15
Total	10	20	20	20	70

Fuente: elaboración propia.

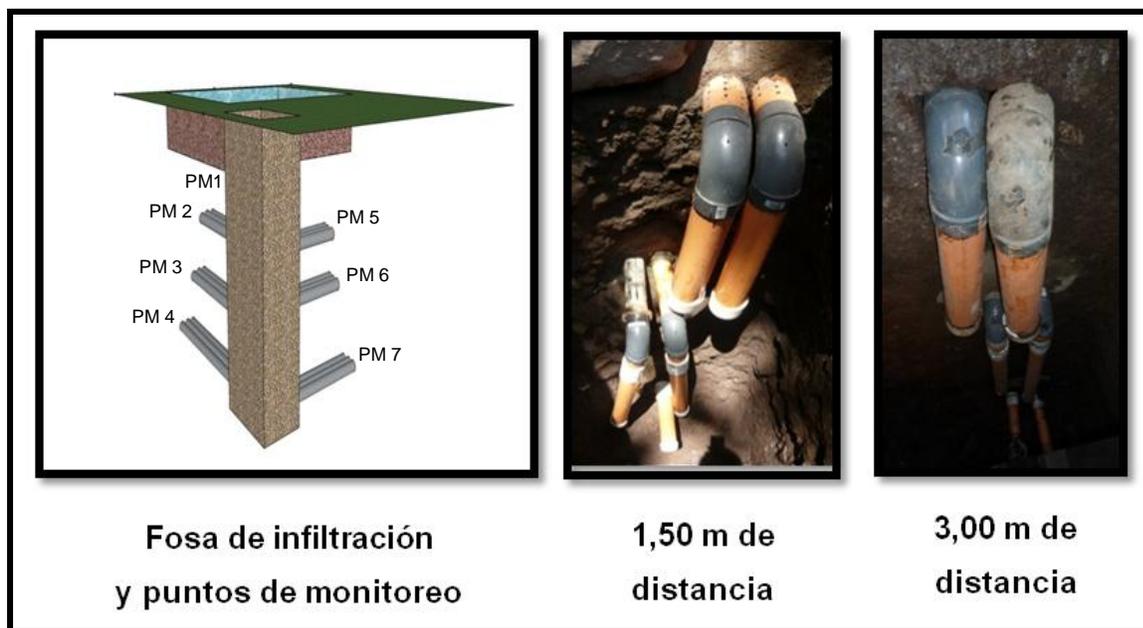
3.4.3. Área de influencia, fosas de infiltración

Mediante el levantamiento topográfico del área (ver anexo 12) se identificó el área de influencia de las fosas de infiltración precedentes, calculando en cada punto de la región la dirección de máxima pendiente identificando la dirección de una gota de agua al deslizarse por el terreno.

3.4.4. Sistema de recolección de agua de infiltración

El sistema de recolección de muestras, estuvo conformado por 7 líneas de infiltración, estilo drenaje francés en el cual se perforaron tubos de 0,0762 m de diámetro nominal (3 pulgadas).

Figura 8. Puntos de monitoreo para la toma de muestras



Fuente: Puntos de monitoreo de la calicata No. 1, beneficio húmedo de café San Isidro Chacayá.

Estos colectores se diseñaron con 1 metro de longitud. Sobre los tubos se colocó grava de 0,0125 m ($\frac{1}{2}$ pulgada) de diámetro, favoreciendo la acumulación y circulación del agua hacia la tubería (ver apéndice). La zona de análisis estaba conformada con material rocoso no consolidado, representando dificultad en la excavación para introducir la tubería.

3.4.4.1. Líneas de infiltración

Cada línea de infiltración, identificada en la figura 8, estaba conformada por dos colectores, para las cuales se consideraron factores de diseño tales como: ángulo del canal, diámetro de los orificios, área de captación y área transversal de flujo.

3.4.4.2. Ángulo del canal

Los colectores se diseñaron de tal forma que el ángulo del canal era pequeño y la diferencia longitudinal entre el eje horizontal y el eje inclinado despreciable. Este ángulo se determina a partir de la pendiente longitudinal del canal, cociente entre el desnivel del fondo y la longitud entre los bordes del canal ubicados a diferente nivel.

$$\text{Pendiente longitudinal} = \frac{\text{Desnivel del fondo}}{\text{Longitud entre bordes}} \quad (\text{ecuación No. 1})$$

Para obtener una variación longitudinal casi despreciable, pero con una inclinación que asegurara el desplazamiento del agua a través del colector, se eligió una pendiente de 1%, con una velocidad máxima de 3 m/s. La longitud entre bordes fue de 1,00 m, considerando el desnivel de fondo de 0,01 m.

Sustituyendo estos valores se tiene que:

$$\text{Pendiente longitudinal} = \frac{0,01}{1,00} * 100$$

$$\text{Pendiente longitudinal} = 1\%$$

La pendiente del 1% equivale a un ángulo de 0.57° , el coseno respectivo es 0,99995, un canal con esta pendiente representa un 0,005% de error porcentual. Una pendiente mayor del 10%, se asocia a canales de gran pendiente, por ello los colectores se diseñaron, tabla VI, para lograr una baja velocidad y evitar así la aireación de la muestra.

Tabla VI. **Diseño de los colectores para una pendiente del 1%**

Profundidad (m)	Eje longitudinal (m)	Desnivel (m)	Eje horizontal (m)	Error porcentual
1,00	1,00	0,01	0,999	0,005%
1,50	1,00	0,01	0,999	
2,25	1,00	0,01	0,999	
3,00	1,00	0,01	0,999	

Fuente: elaboración propia.

3.4.4.3. **Diseño de los orificios**

La perforación de los orificios se realizó en la mitad de la superficie de los tubos, se dispuso de la longitud de arco para lograr una distribución uniforme:

$$L_a = r \cdot \theta \quad (\text{ecuación No. 2})$$

Donde:

- L_a : longitud del arco (m)
- r : radio (m)
- θ : ángulo de la sección del arco (radianes)

Partiendo del radio de la tubería, equivalente a 0,0365 m, se obtuvo una longitud del arco de 0,1148 metros.

$$L_a = 0,0365 \text{ m} * 180^\circ * \frac{\pi}{180^\circ}$$

$$L_a = 0,1148 \text{ m}$$

3.4.4.4. Área de captación

A lo largo de la longitud de arco calculada, para cada tubo, se realizaron perforaciones con barreno, utilizando una broca de ¼ pulgada, siendo el área de flujo de estos orificios igual a:

$$a = \pi \cdot r^2 \quad (\text{ecuación No. 3})$$

Donde:

- a: área del orificio (m^2)
- r: radio del orificio (m^2)

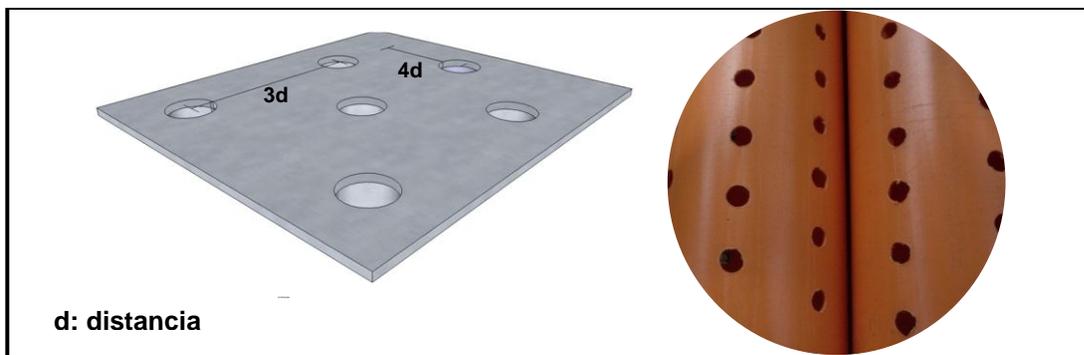
Para un orificio de ¼ pulgada de diámetro, es decir 0,00635 m, el área de captación por orificio es de 31,7 μm^2 :

$$a = \pi * (0,318 \text{ m})^2$$

$$a = 0,0000317 \text{ m}^2$$

En la figura 9 puede observarse que los orificios se perforaron en arreglo triangular. La distancia horizontal desde el centro de un orificio al centro del siguiente es tres veces el diámetro del orificio, es decir, 0,0191 metros. La distancia vertical desde el centro de orificio al centro del siguiente, fue de cuatro veces el diámetro, es decir 0,0254 m.

Figura 9. **Arreglo triangular de los orificios**



Fuente: Diseño de tubo colector.

El número de orificios perforados correspondió a una proporción entre el largo del tubo respecto a la longitud de la base del cuadrado que delimitó cada orificio. Se dejó un margen de 0,07 m antes de la primera perforación debido a que al inicio de cada tubo se colocó un tapón de cloruro de polivinilo. De igual forma se hizo para el final del tubo colocando un codo de 90° unido al tubo que almacenó el agua.

El número de orificios, N_o , fue:

$$N_o = \frac{\text{Largo del tubo}}{\text{Largo del cuadrado}} \quad (\text{ecuación No. 4})$$

Al restar el margen de 0,07 m en cada extremo del tubo, la longitud disponible para la perforación de los orificios es de 0,86 m.

$$N_O = \frac{0,86 \text{ m}}{0,0254 \text{ m}}$$

$$N_O = 34 \text{ orificios}$$

El número de líneas, N_A , con 34 orificios a perforar en cada colector, se calculó de la siguiente forma:

$$N_A = \frac{\text{Longitud del arco}}{\text{Largo del cuadrado}} \quad (\text{ecuación No. 5})$$

$$N_A = \frac{0,1147 \text{ m}}{0,0191 \text{ m}}$$

$$N_A = 6,01 = 6 \text{ líneas con 34 orificios}$$

Se perforaron 6 líneas con 34 orificios a lo largo de la longitud del arco. El total de orificios perforados en cada colector fue de:

$$N_T = N_O \cdot N_A \quad (\text{ecuación No. 6})$$

Donde:

- N_O : número de orificios
- N_A : número de líneas de infiltración
- N_A : número de líneas de infiltración

Para 6 líneas de infiltración con 34 orificios cada una y sustituyendo valores en la ecuación No. 6 se tienen un total de 240 orificios a perforados en cada tubo colector:

$$N_T = 34 \cdot 6 = 204 \text{ orificios}$$

3.4.4.5. Área transversal de flujo

El área transversal de flujo en cada colector se calculó de la siguiente forma:

$$A_f = N \cdot a \quad (\text{ecuación No. 7})$$

Donde:

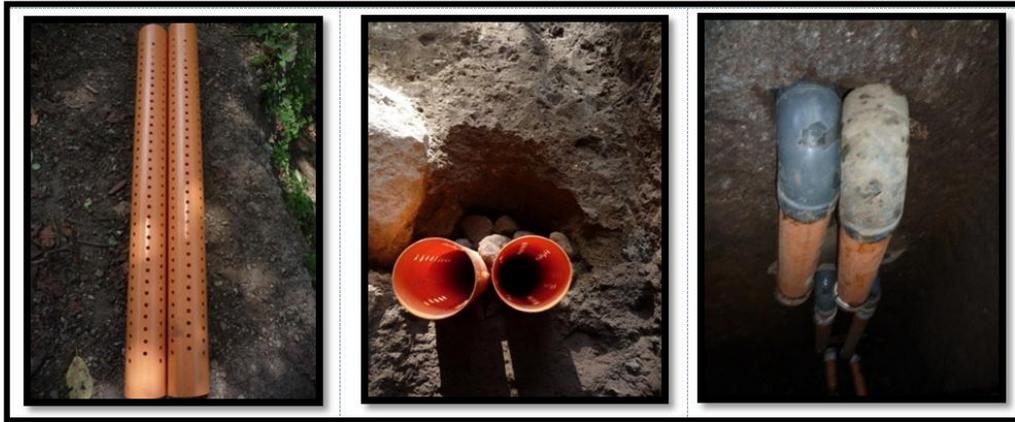
- A_f : área transversal de flujo (cm²)
- a : área de cada orificio (cm²)
- N : número de orificios

Para un tubo colector con 204 orificios y cada uno con área de 31,7 μm^2 , el área transversal de flujo fue de 0,00646 m². Para incrementar esta área de captación se colocaron dos tubos en cada línea de infiltración, siendo el área total de captación, por línea de infiltración, igual a 0,0133 m². En la figura 10 se presenta la construcción de las líneas en cada punto de monitoreo.

$$A_f = 204 \cdot 0,0000317 \text{ m}^2$$

$$A_f = 0,00646 \text{ m}^2$$

Figura 10. **Construcción de las líneas de infiltración**



Fuente: Construcción de las líneas de infiltración de la calicata 1, beneficio húmedo de café San Isidro Chacayá.

3.4.5. **Caudal de agua residual**

Se realizaron mediciones del caudal del agua residual al momento de llenar la laguna de infiltración, tabla VII. Ésta se hizo circular a través de una tubería de 0,064 m de diámetro, por lo que el caudal másico se determinó mediante el peso de aguamiel recolectado en 10 segundos de tiempo:

$$\dot{m} = \frac{W}{t} \quad (\text{ecuación No. 8})$$

Donde:

- \dot{m} : caudal másico (kg/s)
- W: peso del aguamiel (kg)
- t: tiempo(s)

Tabla VII. **Caudal másico de agua residual descargada semanalmente**

No.	Fecha	Tanque de sedimentación	Volumen de agua descargado (m³)	Caudal másico (kg/s)
1	28/02/2011	Pila No. 5	19,53	0,606
2	07/03/2011	Pila No. 2	14,98	0,634
3	16/03/2011	Pila No. 3	13,37	0,619
4	28/03/2011	Pila No. 4	14,98	0,640
5	05/04/2011	Pila No. 5	19,53	0,617

Fuente: elaboración propia.

3.4.6. Análisis químico

La caracterización del agua infiltrada, del agua de descarga y del agua contenida en la fosa de infiltración en función del tiempo, se realizó mediante el análisis químico de las variables respuesta. De igual forma se determinó la composición química del suelo en los diferentes períodos.

3.4.6.1. Análisis de la calidad del agua

El análisis fisicoquímico del agua fue realizado en el Laboratorio de investigación química y ambiental –LIQA– de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, Escuela de Química, Universidad de San Carlos de Guatemala, utilizando los siguientes métodos:

- Demanda química de oxígeno
 - Método: 5220 D: *closed reflux, colorimetric method*.
 - Referencia: Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y aguas residuales. APHA-AWWA-APCF. Vigésima edición, 1998, página 5-17.
 - Límite de cuantificación: 1 mg O₂/L
 - Incertidumbre: calculada con 6 repeticiones al 95% de confianza

- Demanda bioquímica de oxígeno
 - Método: 5210 B, prueba de 5 días, DBO.
 - Referencia: Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y aguas residuales. APHA-AWWA-APCF. Vigésima edición, 1998, página 5-3.
 - Límite de cuantificación: 0.1 µg O₂/L
 - Incertidumbre: calculada con 2 repeticiones

- Nitrógeno total
 - Tratamiento: digestión con peroxidisulfato de sodio a 80 °C.
 - Método: se determina como nitratos y está basada en el método de salicilato de sodio.
 - Referencia: Müller & Weidemann. Formal und naturwissenschaften, Abteilung Limnologie, Wien 1090. Europa, Austria, 1955.
 - Límite de cuantificación: 0,1 mg N/NO₃- L

- Nitrógeno de amonios
 - Método: 4500 NH₃ D, método de sal de fenol.
 - Referencia: Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y aguas residuales. APHA-AWWA-APCF. Vigésima edición, 1998, página 4-136.
 - Límite de cuantificación: 0,1 µg N/NO₂- L
 - Incertidumbre: calculada con 3 repeticiones al 95% de confianza

- Nitrógeno de nitratos
 - Método: salicilato de sodio
 - Referencia: Müller & Weidemann. Formal und naturwissenschaften, Abteilung Limnologie, Wien 1090. Europa, Austria, 1955.
 - Límite de cuantificación: 0,1 mg N/NO₃- L

- Nitrógeno de nitritos
 - Método: 4500 NO₂- B, método colorimétrico.
 - Referencia: Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y aguas residuales. APHA-AWWA-APCF. Vigésima edición, 1998, página 4-146.
 - Límite de cuantificación: 1 µg N/NO₃- L
 - Incertidumbre: calculada con 3 repeticiones al 95% de confianza

- Fósforo de o-fosfatos
 - Método: 4500-P E, método del ácido ascórbico
 - Referencia: Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y aguas residuales. APHA-AWWA-APCF. Vigésima edición, 1998, página 4-199.
 - Límite de cuantificación: 10 $\mu\text{g N/NO}_3\text{- L}$
 - Incertidumbre: calculada con 3 repeticiones al 95% de confianza

- Fósforo total
 - Tratamiento de muestras: digestión con peroxidisulfato de sodio a 80 °C.
 - Método: se determina como fósforo de o-fosfatos y está basada en 4500-P E, método del ácido ascórbico
 - Referencia: Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y aguas residuales. APHA-AWWA-APCF. Vigésima edición, 1998, página 4-199.
 - Límite de cuantificación: 10 $\mu\text{g N/NO}_3\text{- L}$
 - Incertidumbre: calculada con 3 repeticiones al 95% de confianza.

3.4.6.2. Análisis de la calidad del suelo

El análisis del suelo fue realizado en el Laboratorio de suelos, plantas y aguas de ANACAFE (ANALAB).

3.4.6.3. Acuerdo Gubernativo 12-2011

La evaluación del cumplimiento del Acuerdo Gubernativo 12-2011 se realizó mediante la diferencia porcentual entre los límites máximos permisibles (LMP) del artículo 13, y la concentración de los parámetros de interés de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\Delta C_{i\%} = \frac{C_i - LMP}{LMP} \quad (\text{ecuación No. 9})$$

Donde:

- $\Delta[C]_i\%$: diferencia porcentual en la concentración del parámetro de interés y el límite máximo permisible
- LMP: límite máximo permisible, artículo 13, AG 12-2011
- C_i : concentración del parámetro de interés

Por ejemplo, para la concentración de fósforo total en la fosa de infiltración en la primera descarga era de 0,0067 kg/m³ y el LMP es de 0,015, por tanto:

$$\Delta C_{i\%} = \frac{0,0063 - 0,015}{0,015} * 100$$

$$\Delta C_{i\%} = 67\%$$

La concentración de fósforo total es 67 veces menor que el LMP del Acuerdo Gubernativo 12-2011.

El potencial de hidrógeno se comparó con el límite mínimo permisible (pH: 6) determinando la diferencia en la concentración molar de acidez mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta[H^+] = 10^{(LMiP - pH_i)} \quad (\text{ecuación No. 10})$$

Donde:

- $\Delta[H^+]$: diferencia en la concentración molar de acidez
- LMiP: límite mínimo permisible, AG12-2011
- pH_i : potencial de hidrógeno

El pH del agua en la fosa de infiltración en la primera descarga era de 4.4 unidades, sustituyendo en la ecuación anterior se tiene:

$$\Delta[H^+] = 10^{(6 - 4.4)}$$

$$\Delta[H^+] = 39.81 \text{ mg/L}$$

Esto significa que la concentración molar de acidez es 39.81 veces mayor que el $LM_{in}P$ del Acuerdo Gubernativo 12-2011.

3.5. Técnica cuantitativa y cualitativa

El análisis de la variación de la calidad del agua y de la química del suelo se realizó en tres etapas: análisis de la calidad del suelo antes del llenado de la fosa, análisis de la calidad del agua durante la infiltración del agua residual y análisis de la calidad del suelo después de la infiltración. En la figura 11 es posible observar las actividades desarrolladas.

Figura 11. Diagrama de flujo de las actividades desarrolladas



Fuente: elaboración propia.

3.6. Análisis estadístico

Para determinar la variación significativa en la calidad del agua y la química del suelo entre los diferentes puntos de monitoreo se aplicó el análisis de varianza, la definición del modelo matemático se observa en la tabla VIII.

- Diseño estadístico: diseño completamente aleatorizado (DCA)
- Repeticiones: 5 semanas

El número de repeticiones es función de la probabilidad de éxito, la cual está relacionada con la confiabilidad del experimento, y el error estimado; estos términos se relacionan mediante la siguiente ecuación:

$$N = \frac{(Z_{\alpha/2})^2 P Q}{E^2} \quad (\text{ecuación No. 10})$$

Donde:

- N: número de corridas
- $Z_{\alpha/2}$: confiabilidad
- P: probabilidad de éxito
- Q: probabilidad de fracaso (1 – P)
- E: error estimado

Se esperaba obtener una probabilidad del éxito del 95%, al reducir el error sistemático estimado a un 20%, la probabilidad del fracaso será del 5% y la confiabilidad de 1.96. De esta forma, el número de corridas corresponde a:

$$N = \frac{(1.96)^2 (0.95) (0.05)}{0.20^2}$$

$$N = 4.56 = 5 \text{ corridas}$$

- Variables dependientes en el análisis del agua: potencial de hidrógeno, demanda bioquímica de oxígeno, concentración de sólidos totales suspendidos, nitrógeno total, nitrógeno de nitratos, nitrógeno de nitritos, nitrógeno de amonio y fósforo total.
- Variables dependientes en el suelo: potencial de hidrógeno, porcentaje de materia orgánica, porcentaje de nitrógeno disponible, concentración de fósforo disponible, concentración de nitrógeno de amonio y nitrógeno de nitratos.
- Variables independientes: distancia, profundidad. El tiempo se definió como covariable, para simplificar el diseño.
- Comparación de medias: se utilizó la prueba de Tuckey. Todos los datos fueron analizados con el programa INFOSTAT versión 2011.

Tabla VIII. **Definición del modelo estadístico**

Variables independientes	No.	Grados de libertad
Distancia (D)	2	1
Profundidad (P)	3	2
Interacción: Distancia*Profundidad	6	5
El tiempo	5	4

Fuente: elaboración propia

4. CARACTERIZACIÓN DEL EMPLAZAMIENTO

4.1. Topografía

Para evaluar la influencia del agua se establecieron los siguientes puntos de monitoreo: la fosa de infiltración, la calicata No. 1 donde se ubicaron los puntos de observación a diferentes profundidades y distancias y la calicata No. 3 como testigo de la variación natural del suelo.

En el anexo se encuentran ubicados los diferentes puntos de monitoreo y los planos correspondientes a las secciones del terreno que conforman la serie de fosas de infiltración del beneficio húmedo en estudio. La fosa de infiltración en estudio, fue la número 7, con una profundidad máxima de 1,60 m, largo de 6,20 m y ancho de 5,80 m.

4.1.1. Orientación

El lugar de monitoreo se encontraba ubicado en la Aldea San Antonio Chacayá, municipio de Santiago Atitlán, departamento de Sololá. En las siguientes coordenadas geográficas:

- Latitud (N): 14° 37' 18,2''
- Longitud (O): 91° 15' 38,6''
- Altitud: 1586 m.s.n.m.

Esta es una zona geográfica ubicada en pie de monte dentro de la cordillera volcánica.

Presenta suelos profundos de texturas franco arcillo arenosos, permeables con un grado moderado de erosión al momento y alta susceptibilidad a la misma.

4.1.2. Pendiente

El área de las fosas de infiltración se encuentra ubicada a una distancia de 550 m de la orilla del lago de Atitlán, con una inclinación del terreno del 8%, valor medido desde la primera hasta la última fosa. Se determinaron los valores de las pendientes de inclinación de los diferentes puntos de observación (ver tabla IX), para evaluar el área de influencia de la fosa número 7:

Tabla IX. Pendientes de inclinación de los puntos de monitoreo

Punto de interés		Distancia (m)	Diferencia de altura (m)	Pendiente (%)
De	A			
Fosa No. 6	Fosa No. 7	3,95	1,33	34,00
Fosa No. 7	Calicata No.1	1,50	0,83	55,00
Fosa No. 7	Calicata No.1	3,00	0,83	21,00
Fosa No. 7	Fosa No. 8	8,15	1,00	12,00

Fuente: elaboración propia.

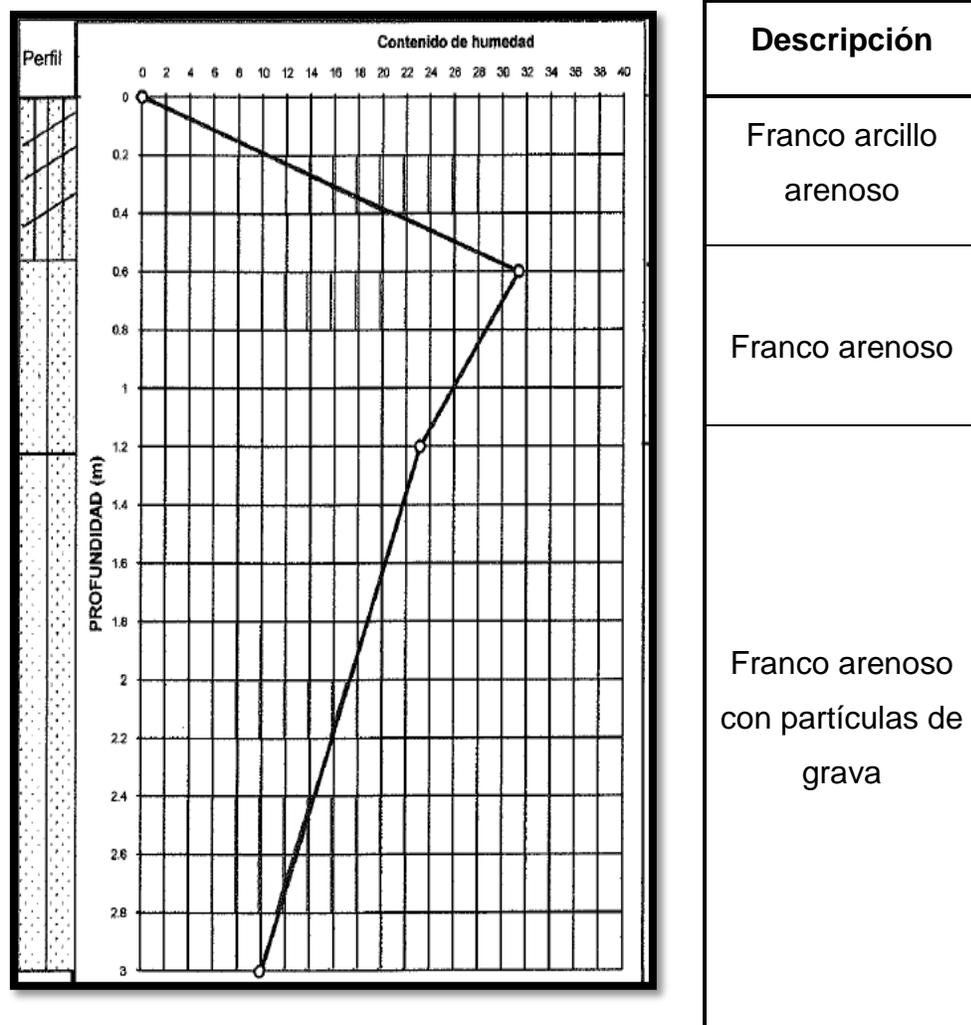
4.2. Caracterización física y química del suelo

Se realizó la caracterización física y química del suelo para comprender los efectos de éste, en la calidad del agua del flujo de infiltración.

4.2.1. Caracterización física del suelo

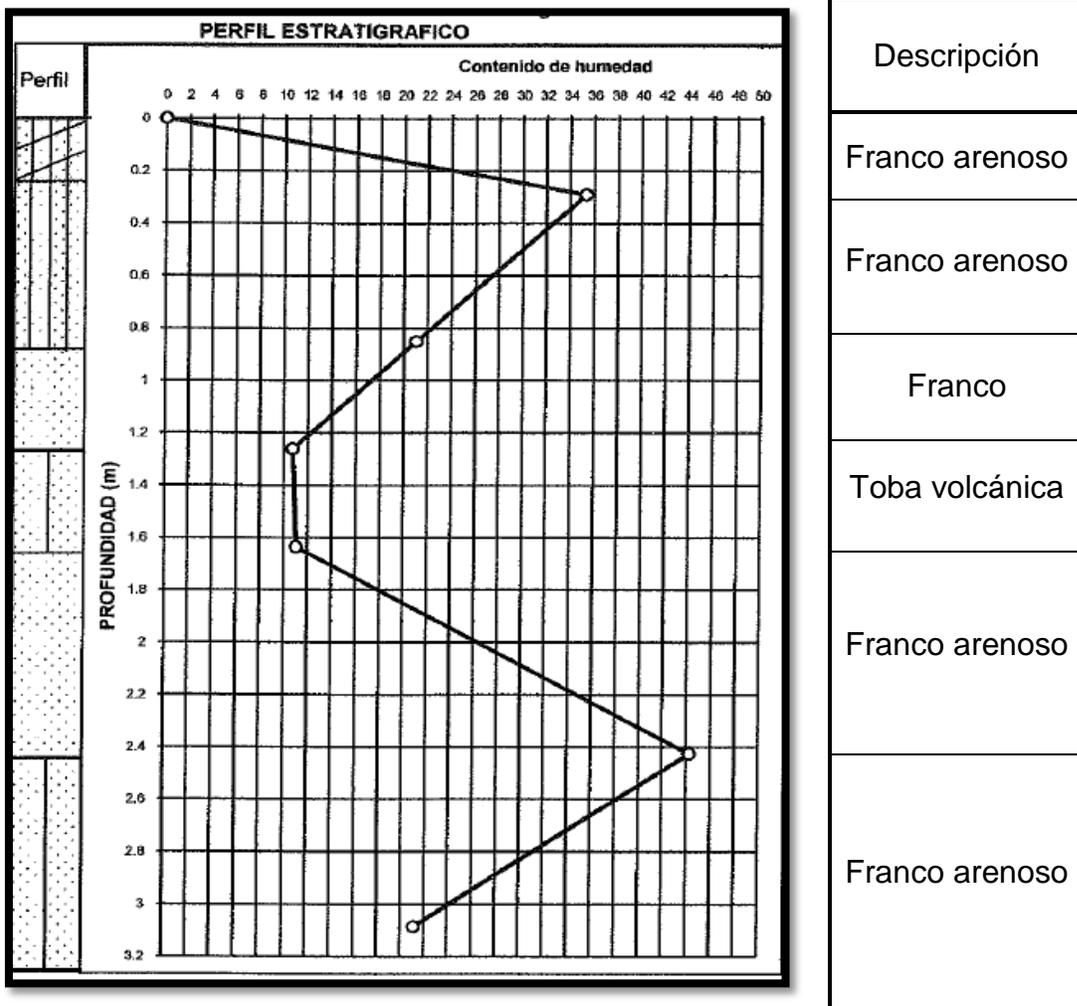
La caracterización del suelo fue realizada en el área de Mecánica de Suelos, del Centro de Investigaciones de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala y en el laboratorio de suelos de ANALAB.

Figura 12. Perfil estratigráfico de la calicata No. 1



Fuente: CII, USAC. Informe No. 300 S.S. O.T. 27,724, ANALAB No. de orden 18-1779.

Figura 13. Perfil estratigráfico de la calicata No. 3



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC. Informe No. 301 S.S. O.T. 27,724, ANALAB 18-2267.

4.2.1.1. Análisis granulométrico

Se realizó un análisis granulométrico para identificar la influencia de la fase sólida en la permeabilidad del agua. Se realizó tamizado y lavado previo, según la Norma AASHTO T-27, T-11.

En la tabla X se observa un alto porcentaje de arenas en la mayoría de los estratos.

Tabla X. **Análisis granulométrico para los diferentes estratos**

Descripción	Clasificación S. C. U.	% Grava	% Arena	% Finos
Calicata 1, estrato 1	SM P.R. A. A-2-4	0,00	56,93	43,07
Calicata 1, estrato 2	SM P.R. A. A-2-4	34,50	47,80	17,71
Calicata 2, estrato 1	SM P.R. A. A-2-4	2,38	64,80	32,83
Calicata 2, estrato 2	SM P.R. A. A-2-4	34,50	37,80	27,71
Calicata 3, estrato 1	SM P.R. A. A-2-4	2,24	56,83	40,94
Calicata 3, estrato 2	SM P.R. A. A-2-4	6,30	45,93	47,76
Calicata 3, estrato 3	SM P.R. A. A-2-4	11,88	81,04	7,09
Calicata 3, estrato 4	SM P.R. A. A-2-4	6,56	58,89	34,55
Calicata 3, estrato 5	SM P.R. A. A-2-4	44,58	51,91	3,51
Calicata 3, estrato 6	SM P.R. A. A-2-4	5,55	57,15	37,30

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC. Informe No. 304, 305, 306, 307, 308, 309, 310, 311, 312, 313 S.S. O.T. 27,724.

4.2.1.2. Textura

La textura fue determinada por el método Bouyoucos, en el área de suelos del laboratorio ANALAB, los resultados se presentan de las tablas XI a la XV.

Tabla XI. **Textura para el suelo de la pared lateral y el suelo del fondo de la fosa de infiltración No. 7, antes de la infiltración**

Ubicación	% Arcilla	% Limo	% Arena	Clase textural
Lateral derecha	23,86	31,06	45,08	Franco
Lateral izquierda	25,86	23,62	50,52	Franco arcillo arenoso
Fondo	15,11	1,89	83,00	Franco arenoso

Fuente: Laboratorio de suelos, plantas y aguas de ANACAFE. No. de Orden 18-1031.

Tabla XII. **Textura para el suelo de la pared lateral y el suelo del fondo de la fosa de infiltración No. 7, después de la infiltración**

Ubicación	% Arcilla	% Limo	% Arena	Clase textural
Lateral derecha	24,06	21,12	54,82	Franco arcillo arenoso
Lateral izquierda	25,96	23,04	50,99	Franco arcillo arenoso
Fondo	21,86	14,90	63,24	Franco arenoso

Fuente: Laboratorio de suelos, plantas y aguas de ANACAFE. No. de Orden 18-1945.

Tabla XIII. **Textura para los diferentes estratos de la calicata No. 2**

Profundidad (m)	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	Clase textural
0,00 a 0,60	20,06	23,25	56,68	Franco arcillo arenoso
0,60 a 1,50	15,85	21,06	63,09	Franco arenoso
1,50 a 2,00	13,68	10,78	75,53	Franco arenoso

Fuente: Laboratorio de suelos, plantas y aguas de ANACAFE. No. de Orden 18-1031.

Tabla XIV. **Clase textural, puntos de observación en la calicata No. 1**

Distancia (m)	Profundidad (m)	% Arcilla	% Limo	% Arena	Clase textural
1,50	0,00 a 0,60	26,18	21,19	52,64	Franco arcillo arenoso
1,50	0,60 a 1,00	22,09	25,28	52,64	Franco arcillo arenoso
1,50	1,00 a 1,50	17,80	22,97	59,23	Franco arenoso
1,50	1,50 a 2,25	11,62	16,75	71,62	Franco arenoso
1,50	2,25 a 3,00	13,63	12,75	73,63	Franco arenoso
3,00	0,00 a 0,60	26,10	25,20	48,71	Franco arcillo arenoso
3,00	0,60 a 1,00	21,91	6,82	71,28	Franco arenoso
3,00	1,00 a 1,50	11,6	14,75	73,63	Franco arenoso
3,00	1,50 a 2,25	11,68	18,85	69,47	Franco arenoso

Fuente: Laboratorio de suelos, plantas y aguas de ANACAFE. No. de Orden 18-1779.

Tabla XV. **Textura para los diferentes estratos de la calicata No. 3**

Estrato	Profundidad (m)	% Arcilla	% Limo	% Arena	Clase textural
Estrato 1	0,00 a 0,30	17,80	20,95	61,50	Franco arenoso
Estrato 2	0,30 a 0,85	19,88	29,13	50,99	Franco
Estrato 3	0,85 a 1,25	17,94	31,31	50,74	Franco
Estrato 5	1,65 a 2,40	13,77	18,95	67,29	Franco arenoso
Estrato 6	2,40 a 3,10	17,98	27,29	54,73	Franco arenoso

Fuente: Laboratorio de suelos, plantas y aguas de ANACAFE. No. de Orden 18-2267.

4.2.1.3. Porosidad

Esta característica física permite cuantificar el porcentaje de espacios vacíos que el suelo contiene por volumen de muestra.

En la tabla XVI se expresan la densidad de partículas y su porosidad correspondiente, en el apéndice podrá encontrar las diferencias entre los horizontes en la calicata 1 y la testigo, así como la variación, en la coloración, que sufrió el suelo después de la intensa percolación del agua residual.

Tabla XVI. **Densidad de partículas, densidad aparente y porcentaje de porosidad, estratos de la calicata No. 1**

Descripción	Profundidad (m)	Densidad aparente (g/cm³)	Densidad de partículas (g/ cm³)	Porosidad (%)
Estrato No. 1	0,00 a 0,60	0,89	2,60	65,66
Estrato No. 1	1,50 a 2,25	1,11	2,60	57,26
Estrato No. 3	2,25 a 3,00	1,60	2,60	38,57

Fuente: Laboratorio de suelos, plantas y aguas de ANACAFE. No. de Orden 18-1123.

4.2.1.4. Permeabilidad

Mediante los ensayos de permeabilidad, Norma AASHTO T125-66, se determinaron las constantes de permeabilidad para los diferentes tipos de suelo encontrados, expresadas en cm/h en la tabla XVII.

Tabla XVII. **Ensayos de permeabilidad para los diferentes tipos de suelo, expresados como coeficiente de permeabilidad**

Descripción	Coeficiente de permeabilidad (cm/h)	Permeabilidad
Calicata 1, estrato 1	0,0004428	Muy lenta
Calicata 1, estrato 2	0,015336	Moderadamente lenta
Calicata 2, estrato 1	0,0003708	Muy lenta
Calicata 2, estrato 2	0,0004536	Muy lenta
Calicata 3, estrato 1	0,00018504	Muy lenta
Calicata 3, estrato 2	0,0024768	Lenta
Calicata 3, estrato 3	0,01458	Moderadamente lenta
Calicata 3, estrato 4	0,000774	Muy lenta
Calicata 3, estrato 5	0,05112	Moderada
Calicata 3, estrato 6	0,04068	Moderadamente lenta

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC. Informe No. 301 S.S. O.T. 27,724.

4.2.2. Composición química

Adicional a las variables respuesta en el suelo, se analizaron las variaciones en la capacidad de intercambio catiónico, el potencial de hidrógeno y la conductividad eléctrica.

4.2.2.1. Capacidad de intercambio catiónico

De la tabla XVIII a la XXI se presentan los valores del potencial de hidrógeno y de la capacidad de intercambio catiónico para los diferentes puntos de observación.

Tabla XVIII. **Capacidad de intercambio catiónico y pH para los diferentes puntos a 1,50 m de distancia de la fosa No. 7**

Profundidad (m)	Febrero		Marzo		Mayo		Junio		Junio	
	pH	CIC	pH	CIC	pH	CIC	pH	CIC	pH	CIC
0,60	5,0	N.D.	5,1	18,25	5,5	N.D.	5,7	46,75	5,7	23,00
1,00	5,2	15,96	6,0	13,00	5,3	22,75	5,2	30,00	5,1	19,25
1,50	5,4	17,24	7,1	13,25	6,0	19,50	6,0	33,00	5,9	42,75
2,25	5,6	3,40	8,2	7,75	6,6	17,25	5,7	19,00	5,8	20,50
3,00	6,7	3,01	8,2	8,50	7,9	7,75	7,2	20,00	5,6	7,00

Fuente: Laboratorio de suelos, plantas y aguas de ANACAFE. No. de Orden 18-748, 18-1031, 18-1179, 18-2739, 18-2940, 18-3147.

Tabla XIX. **Capacidad de intercambio catiónico y pH para los diferentes puntos de observación, 3,00 m de distancia de la fosa No. 7**

Profundidad (m)	Febrero		Marzo		Mayo		Junio		Junio	
	pH	CIC	pH	CIC	pH	CIC	pH	CIC	pH	CIC
0,60	5,0	N.D.	5,1	17,25	5,5	26,00	5,7	40,00	5,7	10,00
1,00	5,2	N.D.	6,0	18,00	5,3	17,00	5,2	35,50	5,1	22,50
1,50	5,4	13,82	7,1	17,50	6,0	24,00	6,0	33,50	5,9	21,00
2,25	5,6	17,25	8,2	8,75	6,6	7,50	5,7	15,50	6,2	9,75
3,00	6,7	3,20	8,2	8,50	7,9	9,25	7,2	10,00	5,6	9,00

Fuente: Laboratorio de suelos, plantas y aguas de ANACAFE. No. de Orden 18-1123, 18-1124, 18-1179, 18-2739, 18-2940, 18-3147.

Tabla XX. **Capacidad de intercambio catiónico y pH para los diferentes estratos de la fosa de infiltración No. 7**

Ubicación	Febrero		Marzo		Mayo		Junio		Junio	
	pH	CIC	pH	CIC	pH	CIC	pH	CIC	pH	CIC
Lateral	5,9	8,94	6,2	13,75	6,2	17,25	5,2	12,75	5,3	18,50
Fondo	5,0	5,55	5,9	14,25	5,5	21,25	6,7	12,15	5,9	15,50

Fuente: Laboratorio de suelos, plantas y aguas de ANACAFE. No. de Orden 18-1031, 18-1945, 18-2940, 18-3147.

Tabla XXI. **Capacidad de intercambio catiónico y pH para los diferentes estratos de la calicata testigo.**

Profundidad (m)	Febrero		Mayo		Junio		Junio	
	pH	CIC	pH	CIC	pH	CIC	pH	CIC
0,60	6,10	N.D.	5,90	25,25	5,90	12,75	6,20	19,25
1,00	6,70	N.D.	6,70	16,00	6,70	18,00	6,70	19,50
1,50	7,00	N.D.	6,90	13,75	6,90	20,00	6,90	19,25
2,25	7,20	N.D.	6,80	12,75	6,80	13,50	6,80	13,50
3,00	7,30	N.D.	7,10	10,50	7,10	10,25	7,10	11,75

Fuente: Laboratorio de suelos, plantas y aguas de ANACAFE. No. de Orden 18-1661, 18-2739, 18-2940, 18-3147.

4.2.2.2. Conductividad eléctrica

De la tabla XXII a la XXV se observan incrementos en la conductividad eléctrica del suelo en los diferentes estratos, derivado de la acumulación de sales durante la inundación; ocasionada en los meses de marzo a mayo por la infiltración del agua miel, y en los meses de mayo a junio por la precipitación pluvial.

Tabla XXII. **Conductividad eléctrica para la fosa de infiltración No. 7**

Ubicación	Marzo	Mayo	Junio
Lateral	191,90	175,4	736,00
Fondo	112,00	320,00	160,80

Fuente: ANALAB. No. de Orden 18-748, 18-1031, 18-1179, 18-2739, 18-2940, 18-3147.

Tabla XXIII. **Conductividad eléctrica, estratos a 1,50 m de distancia de la fosa de infiltración**

Profundidad (m)	Marzo	Mayo	Junio
0,60	242,30	300,00	434,00
1,00	165,70	267,20	415,00
1,50	242,00	436,00	318,00
2,25	43,00	161,80	70,80
3,00	24,93	82,70	46,70

Fuente: ANALAB. No. de Orden 18-748, 18-1031, 18-1179, 18-2739, 18-2940, 18-3147.

Tabla XXIV. **Conductividad eléctrica estratos a 3,00 m de distancia de la fosa de infiltración**

Profundidad (m)	Marzo	Mayo	Junio
0,60	483,00	500,00	600,00
1,00	250,00	655,00	848,00
1,50	64,00	253,30	71,00
2,25	37,30	125,70	441,00
3,00	31,20	133,30	68,20

Fuente: ANALAB. No. de Orden 18-1123, 18-1124, 18-1179, 18-2739, 18-2940, 18-3147.

Tabla XXV. **Conductividad eléctrica para la calicata testigo**

Estrato	Febrero	Mayo	Junio
Estrato No. 1	56,50	200,70	141,50
Estrato No. 2	16,91	28,23	30,20
Estrato No. 3	12,54	54,40	22,61
Estrato No. 4	12,59	23,08	61,20
Estrato No. 5	13,11	46,20	17,81

Fuente: Laboratorio de suelos, plantas y aguas de ANACAFE. No. de Orden 18-1661, 18-2739, 18-2940, 18-3147.

4.3. Climatología

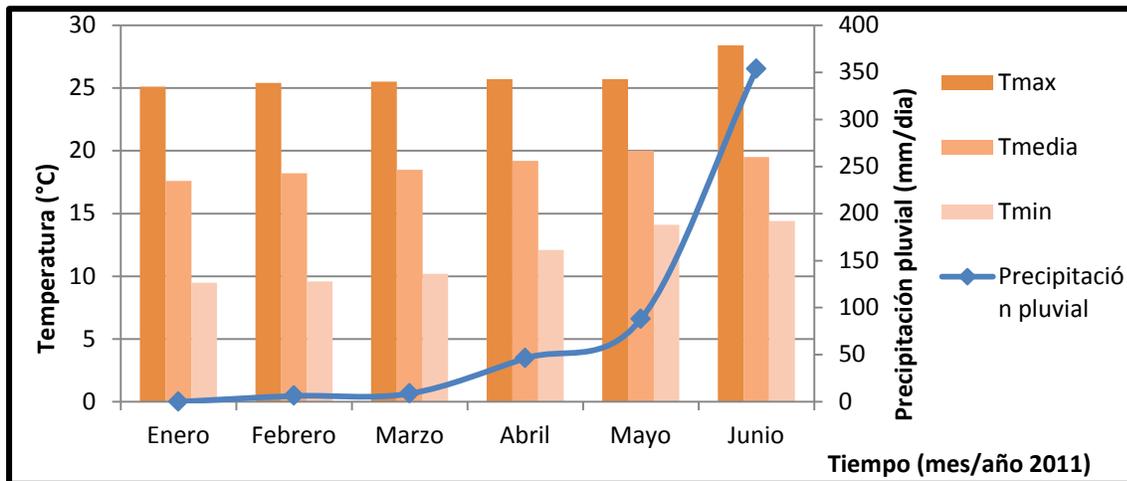
Los factores climatológicos presentados a continuación fueron definidos como factores perturbadores que ocasionan ruido, tabla III.

4.3.1. Precipitación pluvial y humedad relativa

La precipitación pluvial es considerada un aporte de agua en el ciclo hidrológico que afecta el resto de componentes, en este caso influye directamente en la interacción entre el agua residual infiltrada con el suelo de los diferentes estratos.

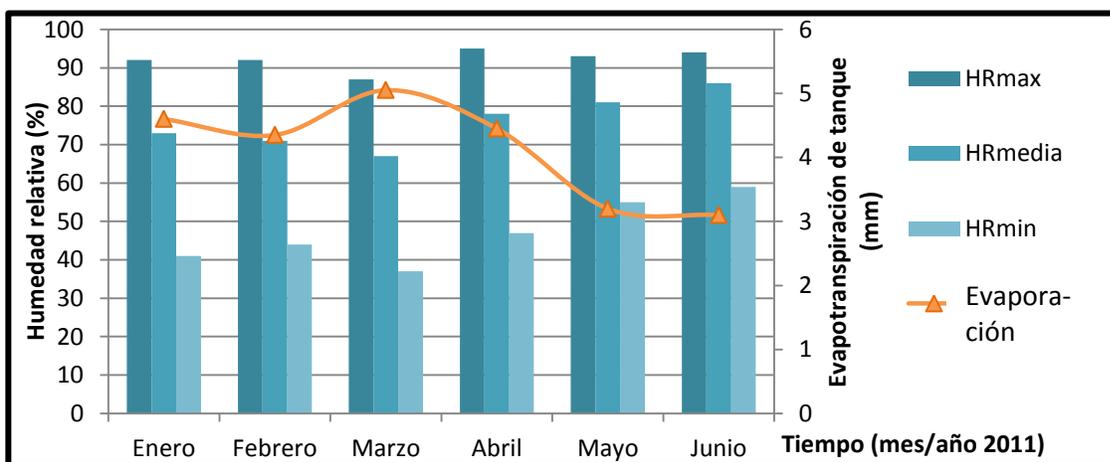
En la figura 15 se observan los valores promedio mensuales de precipitación pluvial y temperatura ambiente, para los primeros 6 meses del año 2011. Mientras que en la figura 16 se observan valores promedio e la humedad relativa y evapotranspiración en tanque.

Figura 14. Precipitación pluvial (mm/día) y temperatura ambiente (°C)



Fuente: INSIVUMEH, sección de Climatología. Estación meteorológica del municipio Santiago Atilán, departamento de Sololá.

Figura 15. Evapotranspiración de tanque (mm) y humedad relativa máxima, mínima y promedio (%)



Fuente: INSIVUMEH, sección de Climatología. Estación meteorológica del municipio Santiago Atilán, departamento de Sololá.

4.3.2. Viento

La dirección y velocidad del viento, se muestran en la tabla XXVI, se presentan como factores perturbadores que ocasionan ruido, debido a que favorecen la evaporación del agua.

Tabla XXVI. Dirección y velocidad del viento (kilómetros por hora)

AÑO	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
2009	6,8 _{CALMA}	11,0 _{VARIA}	6,7 _{VARIA=9}	7,0 _{CALMA=0}	4,5 _{CALMA=0}	4,3 _{CALMA}
2010	10,5 _W	7,1 _W	7,4 _{NW}	7,5 _{NW}	7,5 _{NW}	7,5 _{NW}
2011	8,4	8,0 _{NW}	8,5 _{NW}	7,3 _{NW}	7,8 _{NW}	7,4 _W

Fuente: INSIVUMEH, sección de Climatología. Estación meteorológica del municipio Santiago Atilán, departamento de Sololá.

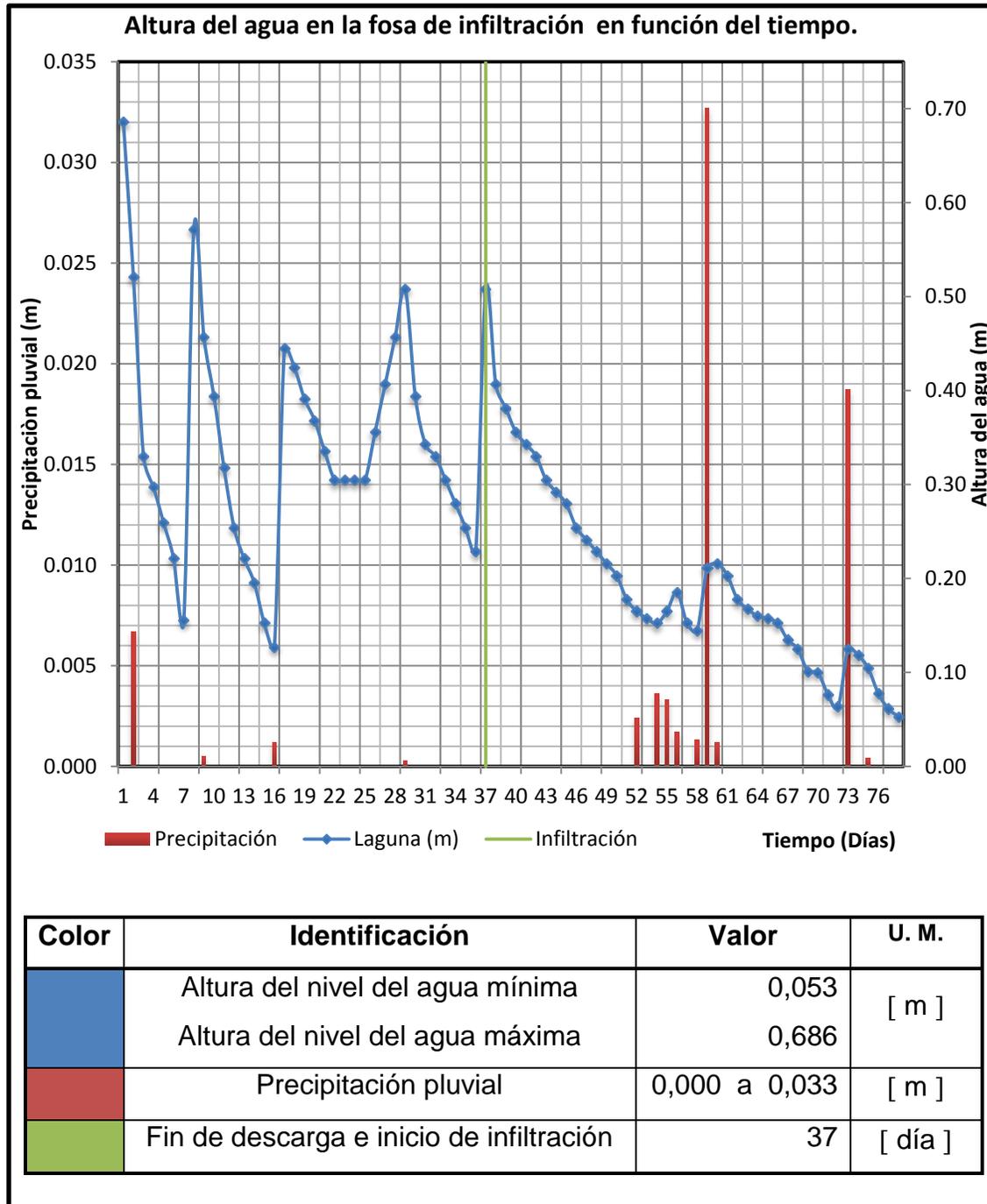
5. RESULTADOS

5.1. Calidad del agua contenida en la fosa de infiltración durante los períodos de descarga e infiltración

En la figura 16 se presentan las variaciones del nivel del agua en la fosa de infiltración en función del tiempo; comparando en el eje secundario con la precipitación pluvial, expresada en metros por día. De las figuras 17 a la 21 se observa la variación en la concentración de las variables respuesta, las cuales tienen los siguientes aspectos en común:

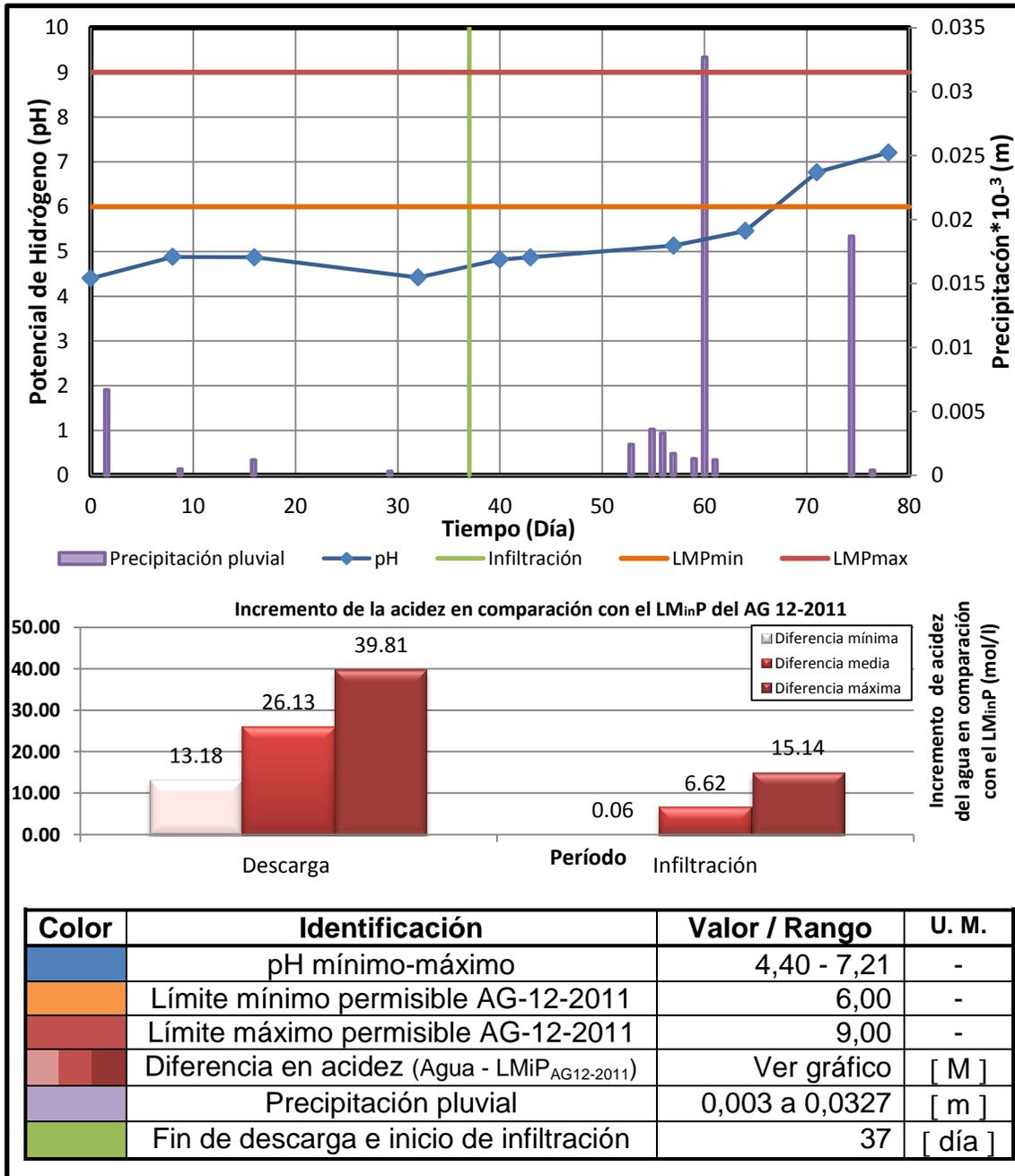
- Eje de las abscisas: representación del tiempo (día).
- Eje de las ordenadas: concentración del parámetro de interés.
- Eje secundario: representación de la precipitación pluvial (m/día).
- Períodos: la línea vertical color verde representa la separación entre el período de descarga del agua residual en la fosa y el período de infiltración.
- Límite máximo permisible: es representado por la línea horizontal color naranja. En el caso del pH, el LM_iP se representa por una línea roja.
- Gráfico comparativo de barras: diferencia porcentual entre el LMP establecido en el AG 12-2011 y el valor mínimo, máximo y promedio de la concentración de cada parámetro de interés tanto en el agua de descarga como en el agua infiltrada.

Figura 16. Nivel del agua (en metros) en función del tiempo



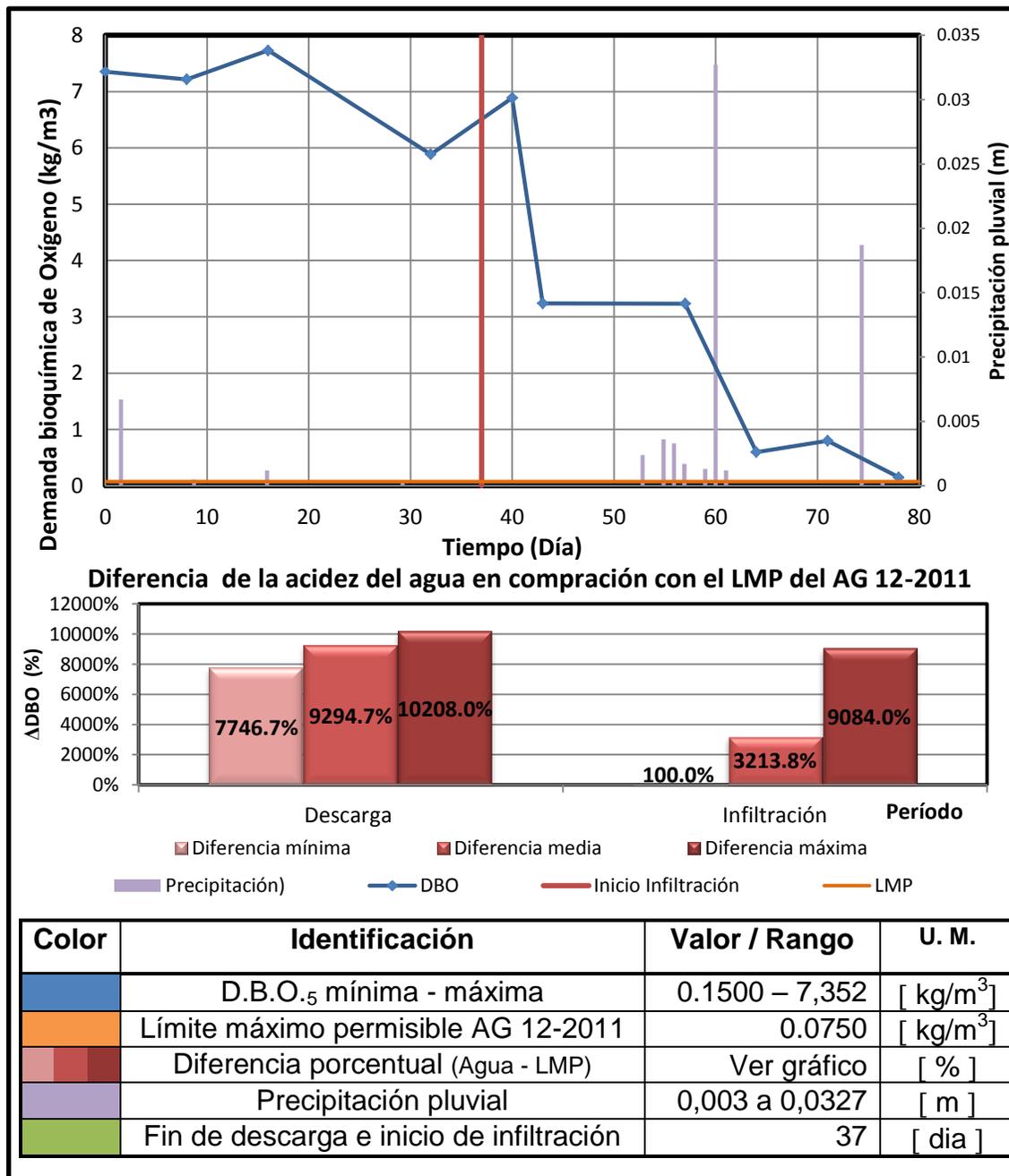
Fuente: elaboración propia.

Figura 17. Variación del pH en función del tiempo, en la fosa de infiltración No. 7



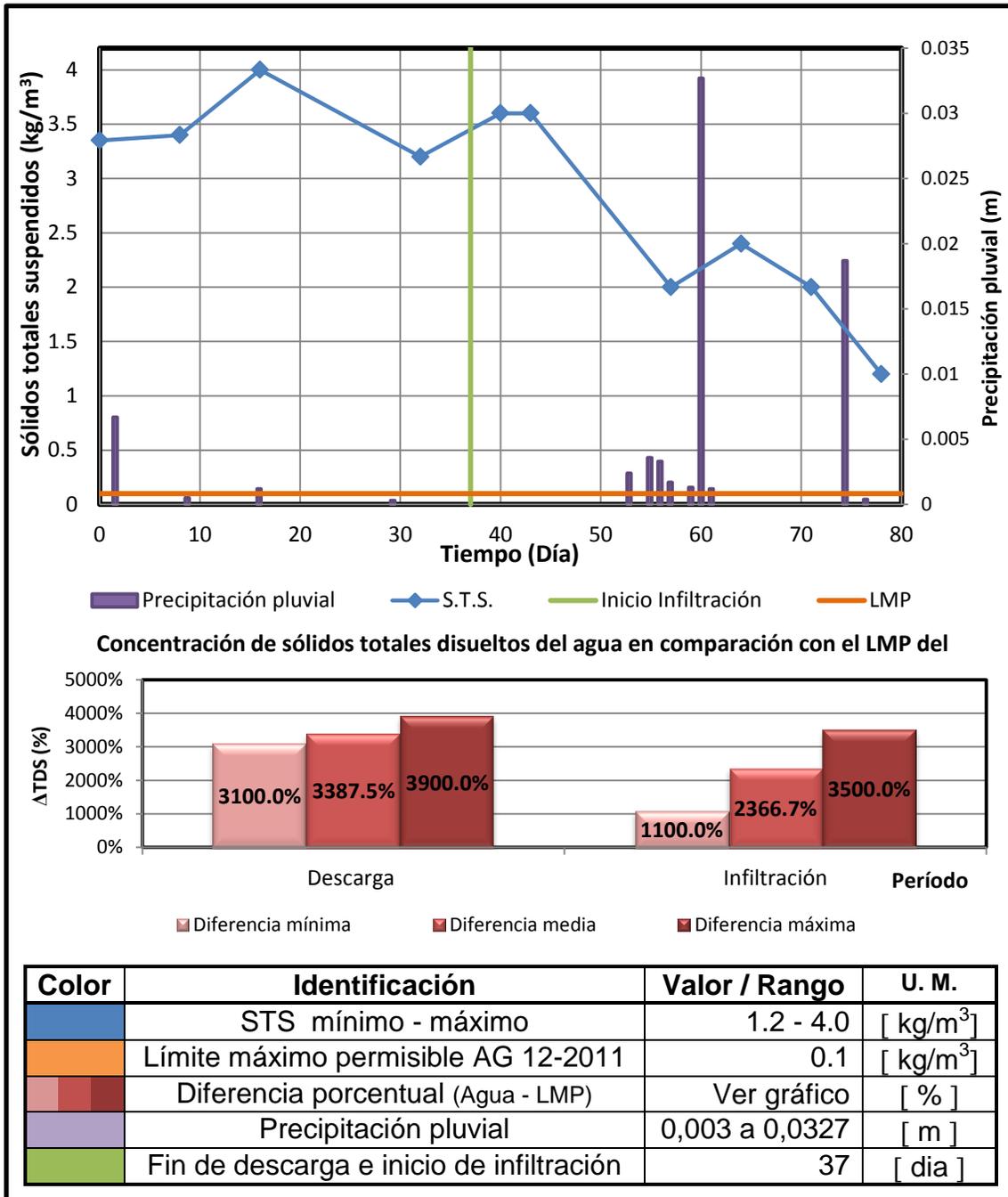
Fuente: elaboración propia.

Figura 18. Demanda bioquímica de oxígeno en función del tiempo, en la fosa de infiltración No. 7



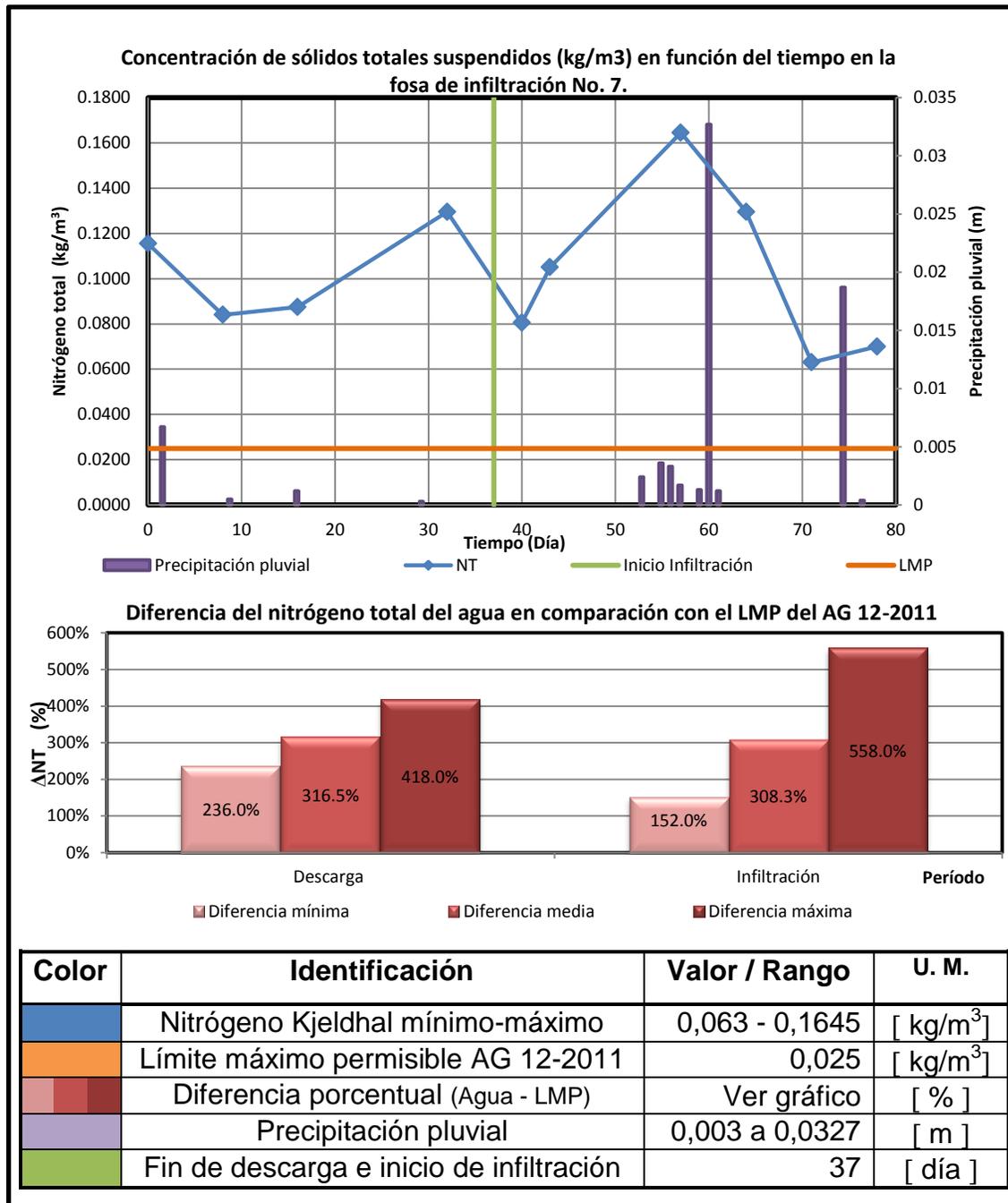
Fuente: elaboración propia.

Figura 19. **Concentración de los sólidos totales suspendidos en función del tiempo, en la fosa de infiltración No. 7**



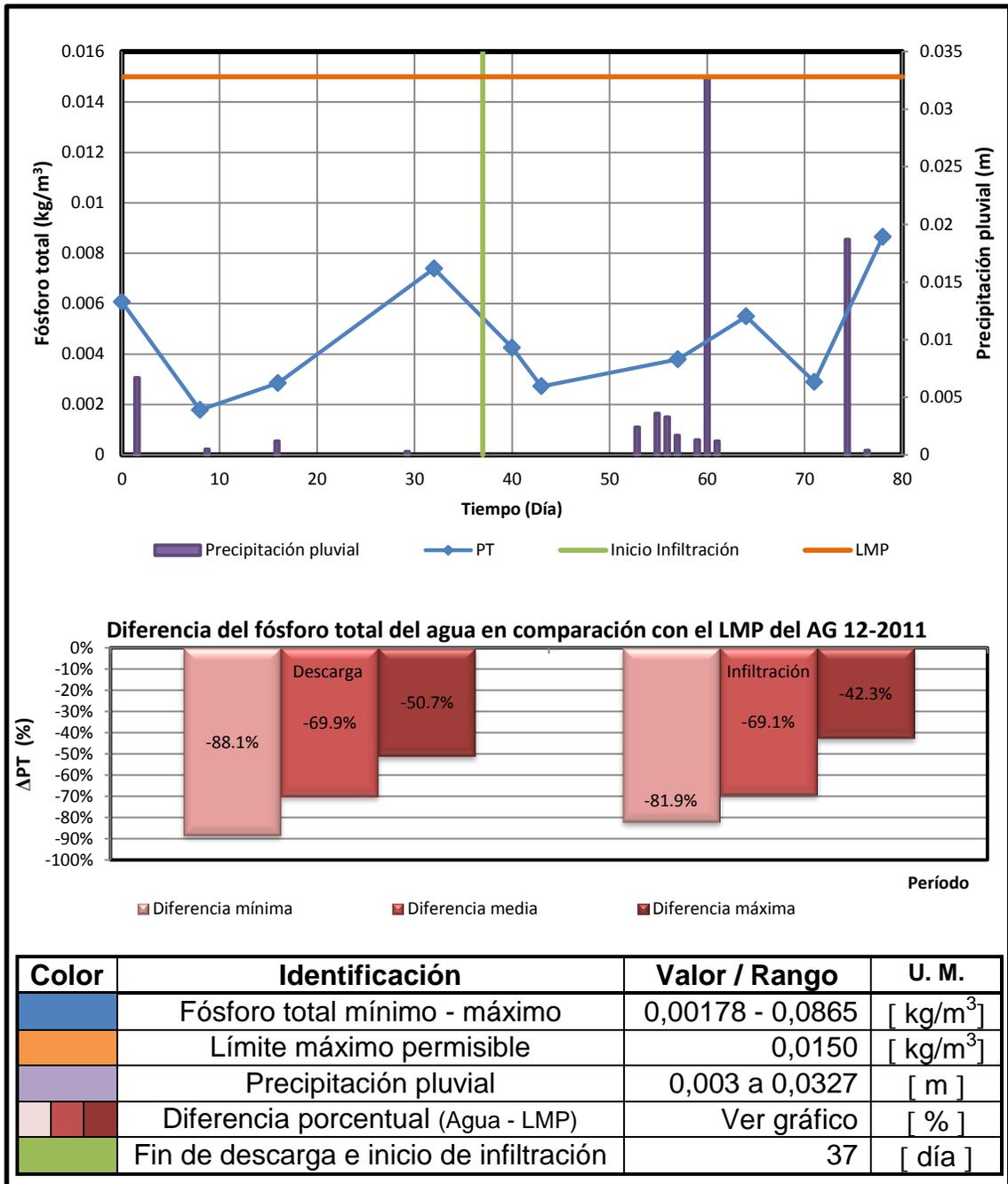
Fuente: elaboración propia.

Figura 20. Concentración del nitrógeno total Kjendhal en función del tiempo, en la fosa de infiltración No. 7



Fuente: elaboración propia.

Figura 21. **Concentración del fósforo total en función del tiempo, en la fosa de infiltración No. 7**



Fuente: elaboración propia.

5.2. Análisis químico del suelo y de la calidad del agua infiltrada

Las figuras 21 a la 27 muestran las variaciones de los parámetros de interés en la calidad del agua infiltrada: sólidos totales suspendidos y pH (los valores de pH en el suelo se pueden encontrar en el capítulo 4, sección 4.2.2.1.). Asimismo, se presentan los resultados para la materia orgánica tanto en agua como en el suelo.

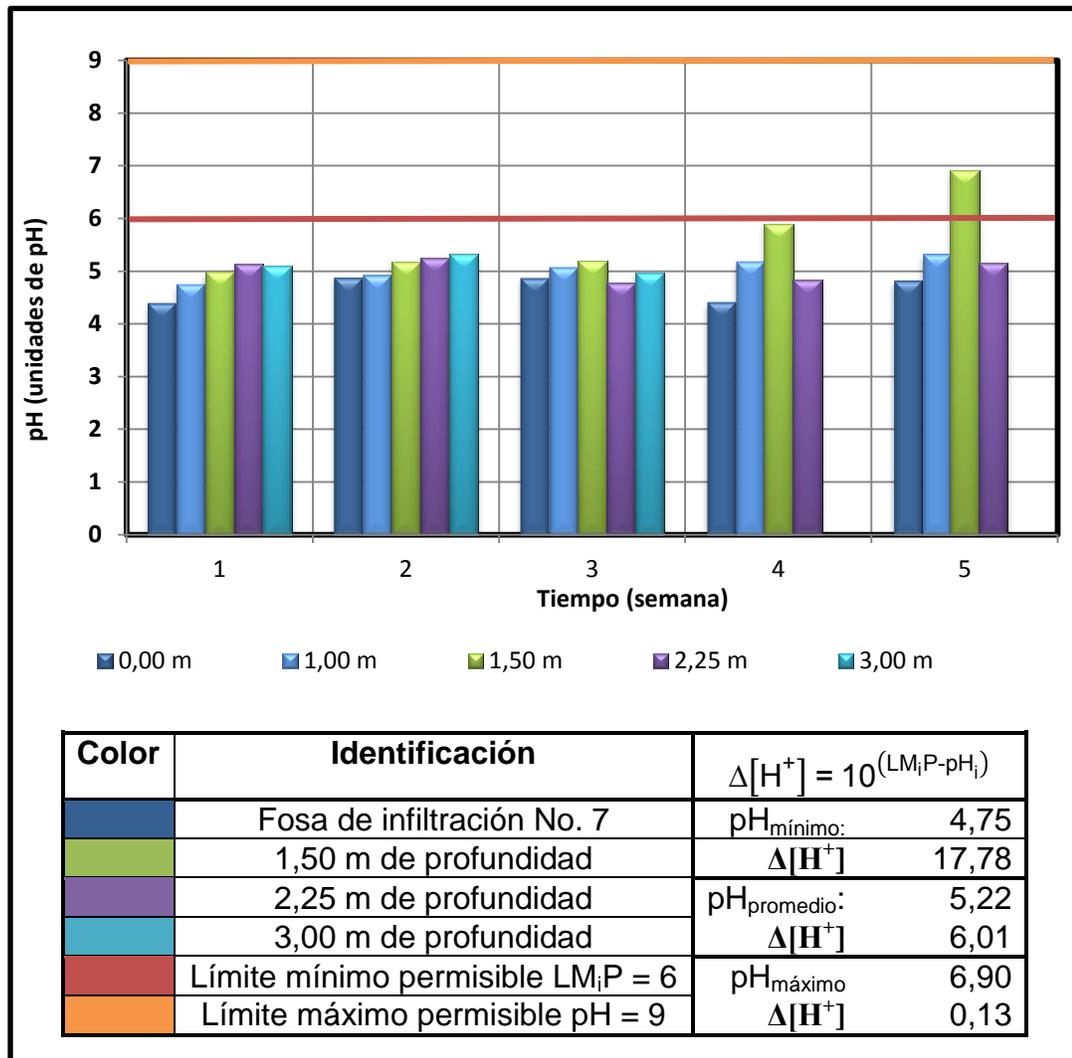
Para cada parámetro se expresa la variación entre los puntos de monitoreo (1,00, 1,50, 2,25 y 3,00 m de profundidad) identificada en dos figuras diferentes: 1,50 m y 3,0 m de distancia. Para cada parámetro se describe el análisis estadístico aplicado para la comprobación de la hipótesis; en los casos donde fue rechazada se presenta la prueba de Tuckey. Los aspectos comunes de las gráficas, son los siguientes:

- Eje de las abscisas: para el agua infiltrada se representa el tiempo en semanas. Para el suelo se observa el porcentaje de materia orgánica.
- Eje de las ordenadas: representación de la concentración del parámetro de interés en el agua infiltrada o de la profundidad en el análisis del suelo.
- Límite máximo permisible: es representado por la línea horizontal de color naranja. En el caso del pH, el LM_iP se representa por una línea de color rojo.
- Tabla descriptiva: identifica cada punto de monitoreo con su color respectivo. Asimismo, presenta la diferencia porcentual entre el LMP establecido en el AG 12-2011 y el valor mínimo, máximo y promedio de la concentración del parámetro de interés, para ambos períodos.

5.2.1. Potencial de hidrógeno (pH)

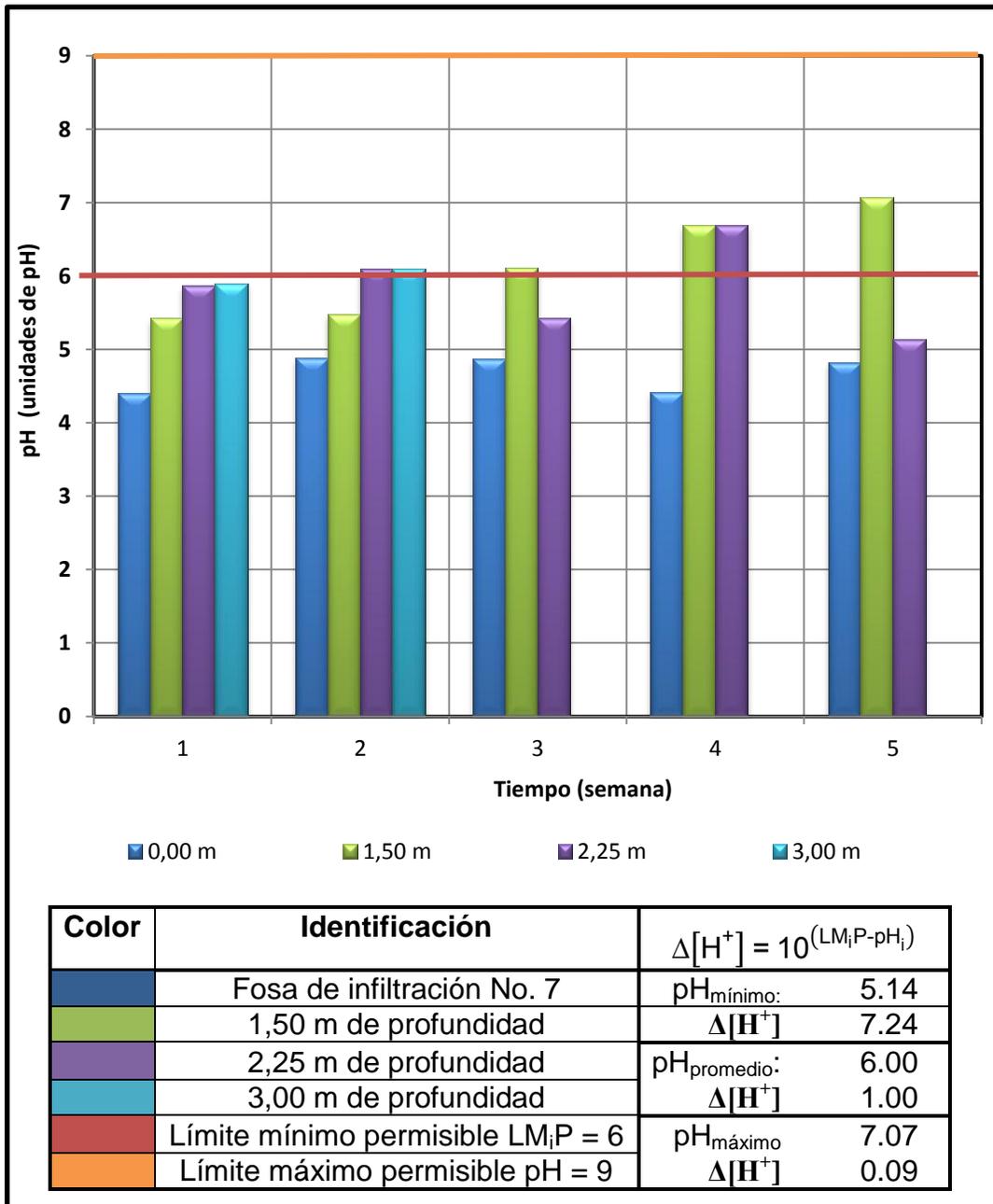
A continuación se presentan las variaciones del potencial de hidrógeno entre los diferentes puntos de monitoreo.

Figura 22. pH en función del tiempo, 1,50 de distancia de la fosa No. 7



Fuente: elaboración propia.

Figura 23. Variación del pH a diferentes profundidades, 3,00 m de distancia de la fosa No. 7, en función del tiempo



Fuente: elaboración propia.

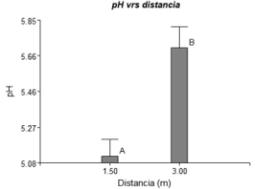
Tabla XXVII. **Análisis de varianza para el pH, es significativamente diferente si $P < 0.05$**

F.V.	G.L.	S.C.	C.M.	F	P	Criterio
Modelo estadísti	9	12,71	1,41	7,50	< 0,0001	Se rechaza H_0
Distancia (m)	1	2,54	2,54	13,47	0,0009	Se rechaza H_0
Profundidad (m)	3	7,74	1,93	10,28	< 0,0001	Se rechaza H_0
Tiempo (días)	1	1,36	1,36	7,23	0,0116	Se rechaza H_0
Interacción D*P	3	1,08	0,36	1,90	0,1502	Se acepta H_0
Error	30	5,65	0,19	Variable N R ² R ² Aj CV		
Total	39	18,35		pH 40 0.69 0.60 8.16		

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVIII. **Prueba de Tuckey, dos distancias desde la fosa No. 7**

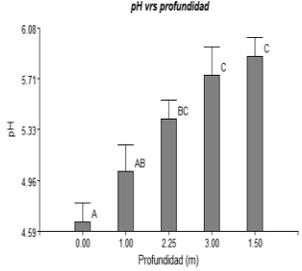
Distancia (m)	Medias	E.E.	Grupo
1,5	5,12	0,090	A
3,0	5,70	0,018	B
Significativamente diferentes si $P < 0.05$			



Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIX. **Prueba de Tuckey, a diferentes profundidades**

Profundidad (m)	Medias	E.E.	Grupo
0,00	4,66	0,14	A
1,00	5,03	0,19	A B
2,25	5,41	0,14	B C
3,00	5,73	0,21	C
1,50	5,87	0,14	C
Significativamente diferentes si $P < 0.05$			

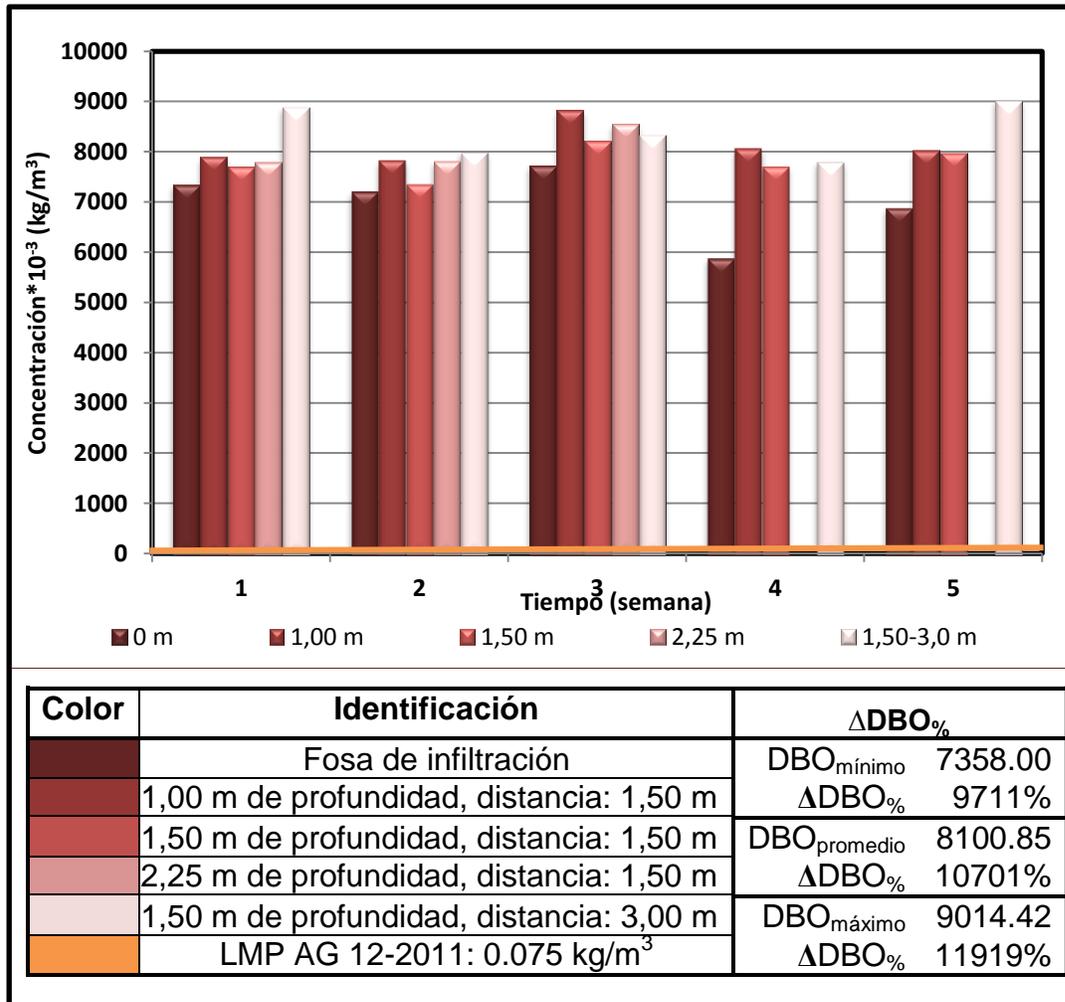


Fuente: elaboración propia.

5.2.2. Concentración de la materia orgánica en el suelo y agua

El contenido de materia orgánica en el agua se midió indirectamente a través de la determinación de la cantidad de oxígeno requerido por los microorganismos, para degradarla en 5 días.

Figura 24. Variación de la concentración de la demanda bioquímica de oxígeno entre los diferentes puntos de observación



Fuente: elaboración propia.

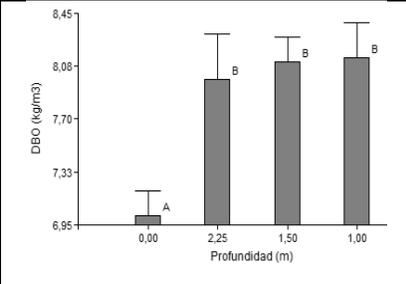
Tabla XXX. **Análisis de varianza para la DBO₅ en el agua, es significativamente diferente si P < 0.05**

F.V.	G.L.	S.C.	C.M.	F	P	Criterio										
Modelo	6	8,81	1,47	4,95	0,0027	Se rechaza H _o										
D (m)	1	9,6*10 ⁻⁵	9,6*10 ⁻⁵	3,2*10 ⁻⁴	0,9858	Se acepta H _o										
P (m)	3	8,07	2,69	9,07	0,0005	Se rechaza H _o										
D*P	1	0,47	0,4	1,58	0,2231	Se acepta H _o										
T (días)	1	0,28	0,28	0,93	0,3463	Se acepta H _o										
Error	1	6,23	0,30	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Variable</th> <th>N</th> <th>R²</th> <th>R² Aj</th> <th>CV</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>DBO (kg/m3)</td> <td>28</td> <td>0,59</td> <td>0,47</td> <td>7,06</td> </tr> </tbody> </table>			Variable	N	R ²	R ² Aj	CV	DBO (kg/m3)	28	0,59	0,47	7,06
Variable	N	R ²	R ² Aj				CV									
DBO (kg/m3)	28	0,59	0,47	7,06												
Total	27	15,03														

Fuente: elaboración propia.

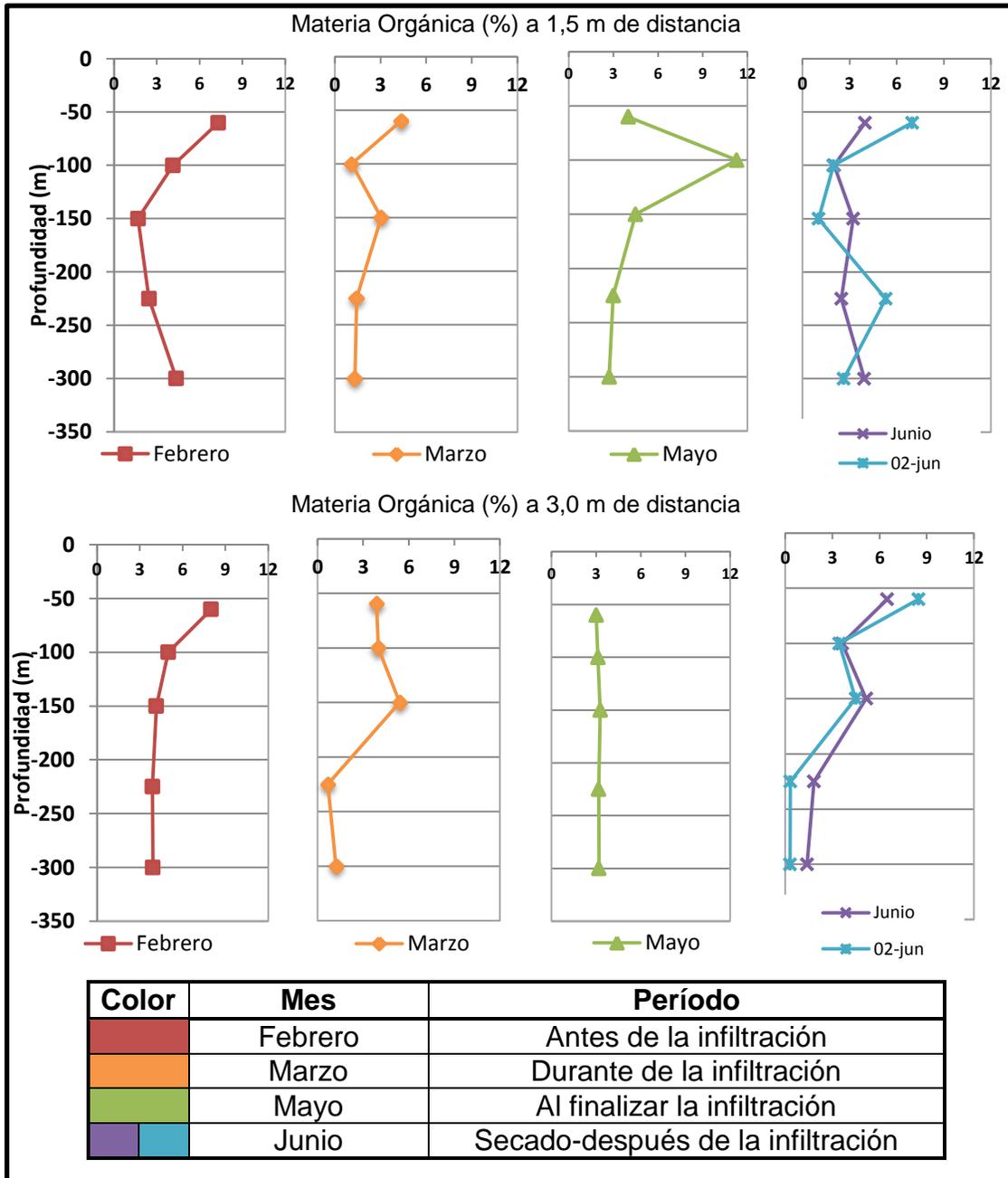
Tabla XXXI. **Prueba de Tuckey para la variación de la DBO₅ a diferentes profundidades, son significativamente diferentes si P<0.05**

Profundidad (m)	Medias	E.E.	Grupo
0,00	7,02	0,17	A
2,25	7,98	0,32	B
1,50	8,11	0,17	B
1,00	8,14	0,24	B



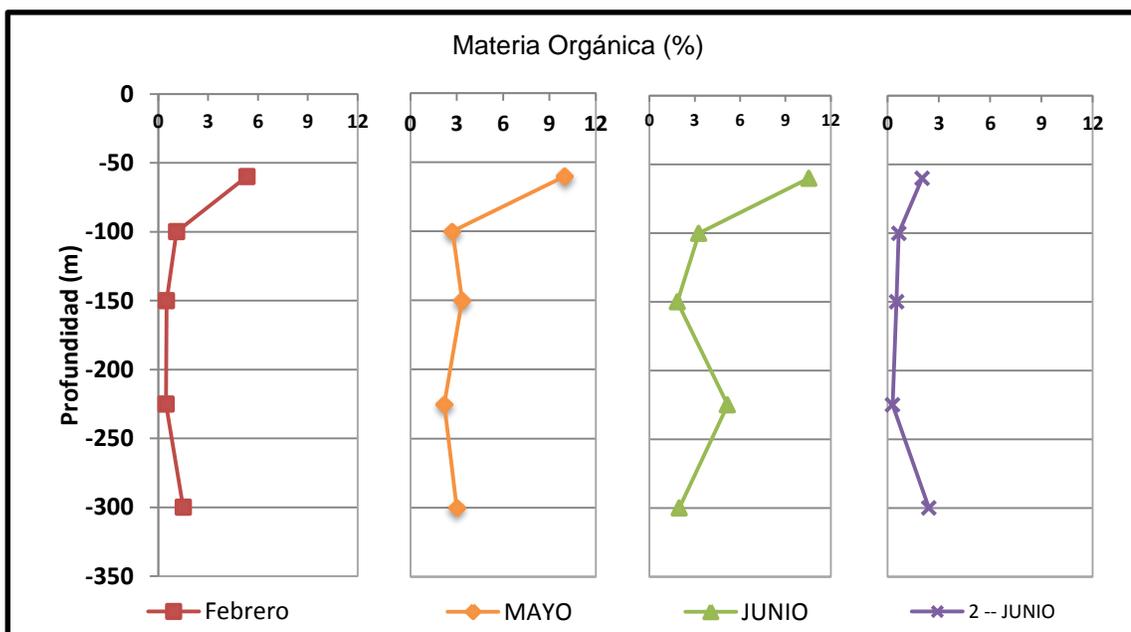
Fuente: elaboración propia.

Figura 25. **Variación de la materia orgánica (%), entre los diferentes puntos de observación, a 1,5m y 3,0 m de distancia**



Fuente: elaboración propia.

Figura 26. **Variación de la materia orgánica (%), entre los diferentes puntos de observación en la calicata testigo**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXII. **Análisis de varianza para la materia orgánica en el suelo**

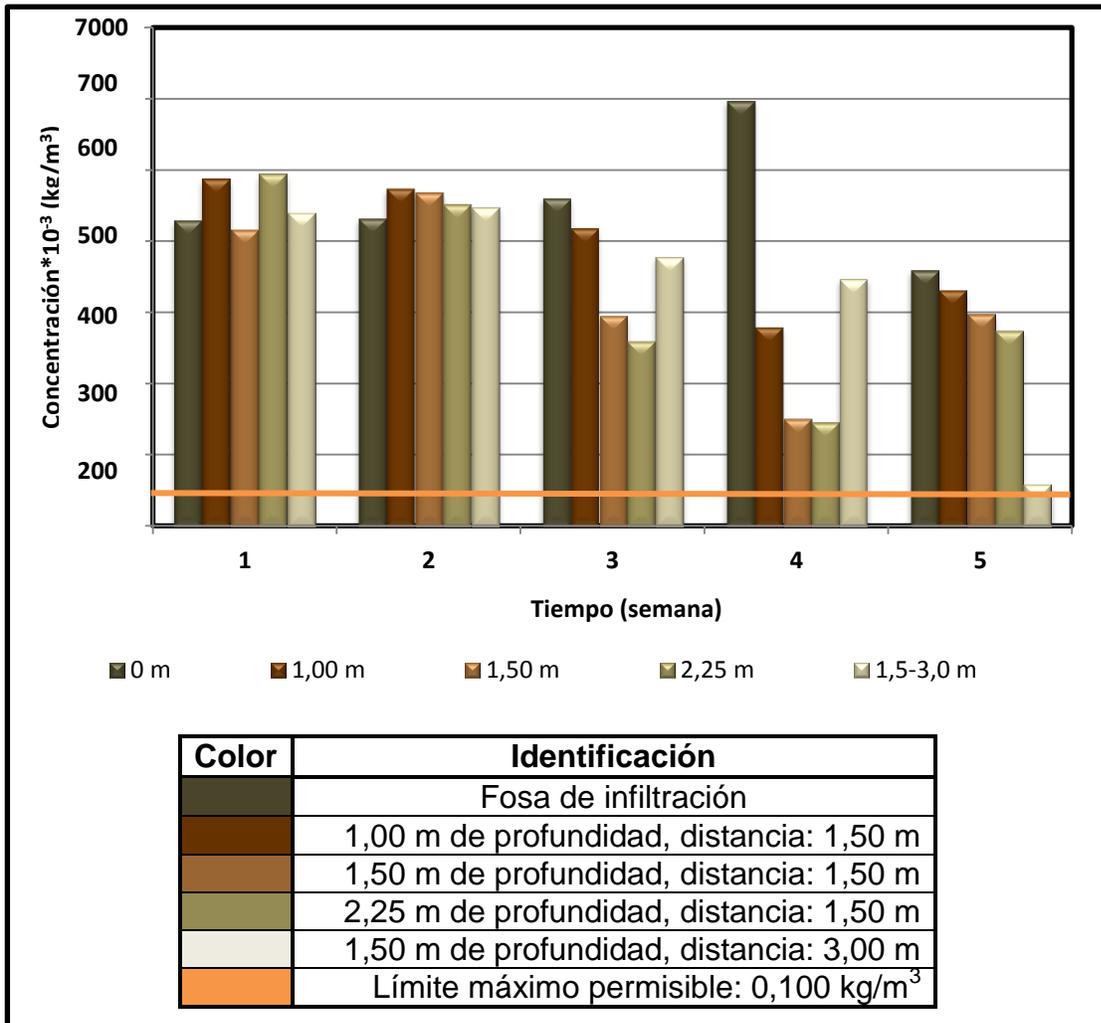
F.V.	G.L.	S.C.	C.M.	F	P	Criterio			
Modelo	10	83,99	8,40	2,21	0,0375	Se rechaza H ₀			
D (m)	1	0,02	0,02	0,01	0,9396	Se acepta H ₀			
P (m)	4	68,53	17,13	4,52	0,0043	Se rechaza H ₀			
D*P	4	13,99	3,50	0,92	0,4610	Se acepta H ₀			
t (días)	1	1,45	1,45	0,38	0,5396	Se acepta H ₀			
Error	39	147,97	3,79						
Total	49	231,96	-						
				Variable	N	R ²	R ²	Aj	CV
				MO (mg/L)	50	0,36	0,20	53,61	

Fuente: elaboración propia.

5.2.3. Sólidos totales suspendidos

Este parámetro permite identificar la presencia de partículas mayores a 1,2 micras que se encuentran dispersas en la solución.

Figura 27. Variación de la concentración de sólidos totales suspendidos en el agua infiltrada entre los diferentes puntos de observación



Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIII. **Análisis de varianza para los STS, entre los diferentes puntos de monitoreo, es significativamente diferente si $P < 0.05$**

F.V.	G.L.	S.C.	C.M.	F	P	Criterio										
Modelo	6	15,94	2,66	3,21	0,0195	Se rechaza H_0										
Distancia (m)	1	1,08	1,08	1,30	0,2660	Se acepta H_0										
Profundidad (m)	3	6,12	2,04	2,46	0,0879	Se acepta H_0										
Interacción D*P	1	0,22	0,22	0,26	0,6145	Se acepta H_0										
Tiempo (días)	1	8,52	8,52	10,29	0,0039	Se rechaza H_0										
Error	23	19,05		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Variable</th> <th>N</th> <th>R²</th> <th>R² Aj</th> <th>CV</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>TDS (kg/m³)</td> <td>30</td> <td>0.46</td> <td>0.31</td> <td>23.05</td> </tr> </tbody> </table>			Variable	N	R ²	R ² Aj	CV	TDS (kg/m ³)	30	0.46	0.31	23.05
Variable	N	R ²	R ² Aj				CV									
TDS (kg/m ³)	30	0.46	0.31	23.05												
Total	29	34,98														

Fuente: elaboración propia.

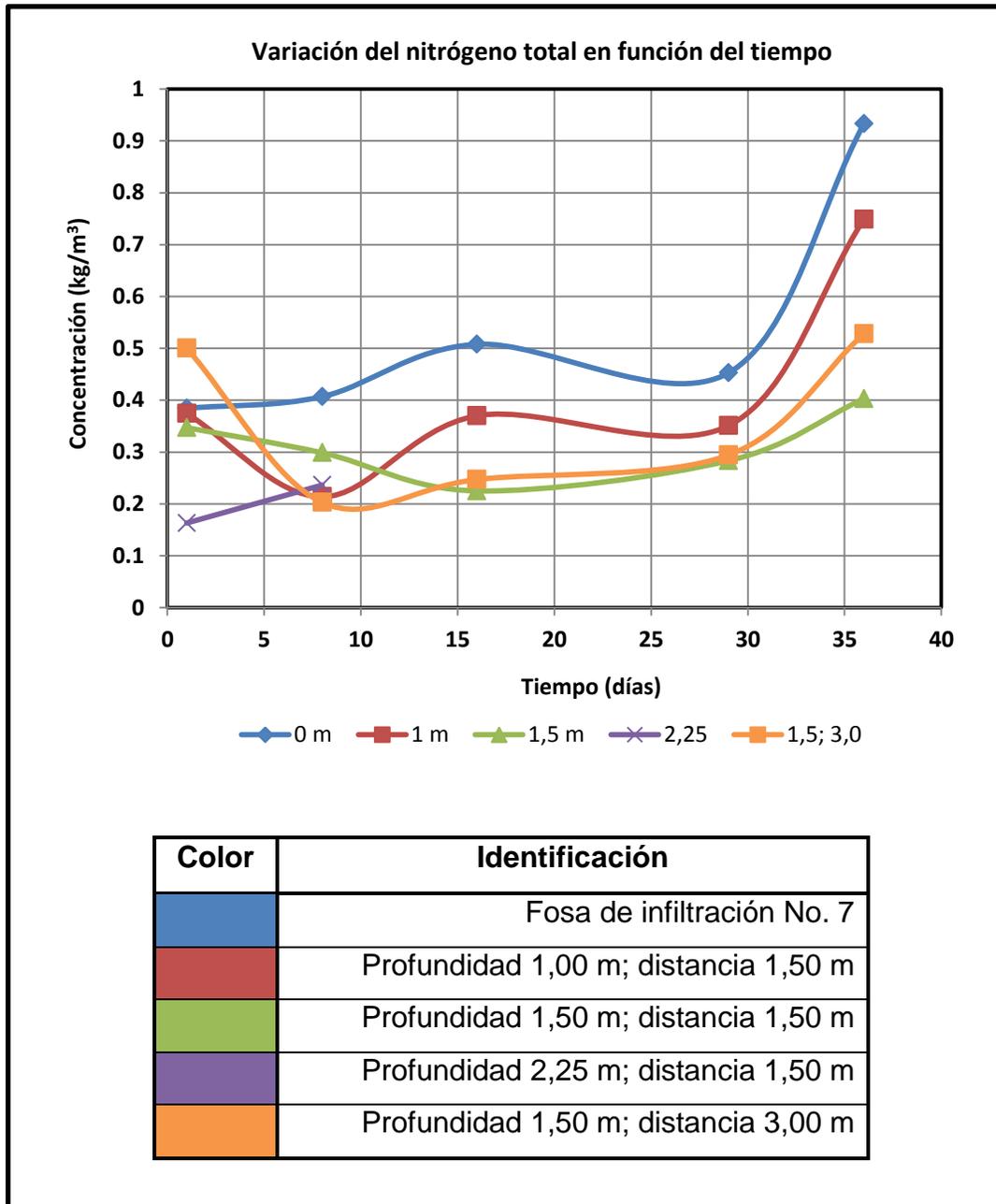
5.3. Análisis de la concentración de las especies del nitrógeno en el agua infiltrada y en el suelo

Para comprender el efecto de la interacción entre el suelo y el agua en la concentración de nitrógeno, se analizaron las variaciones en la concentración de las diferentes especies, tales como: nitrógeno de amonio, nitrógeno de nitritos, nitrógeno de nitratos y nitrógeno total.

5.3.1. Concentración del nitrógeno y sus especies en el agua infiltrada

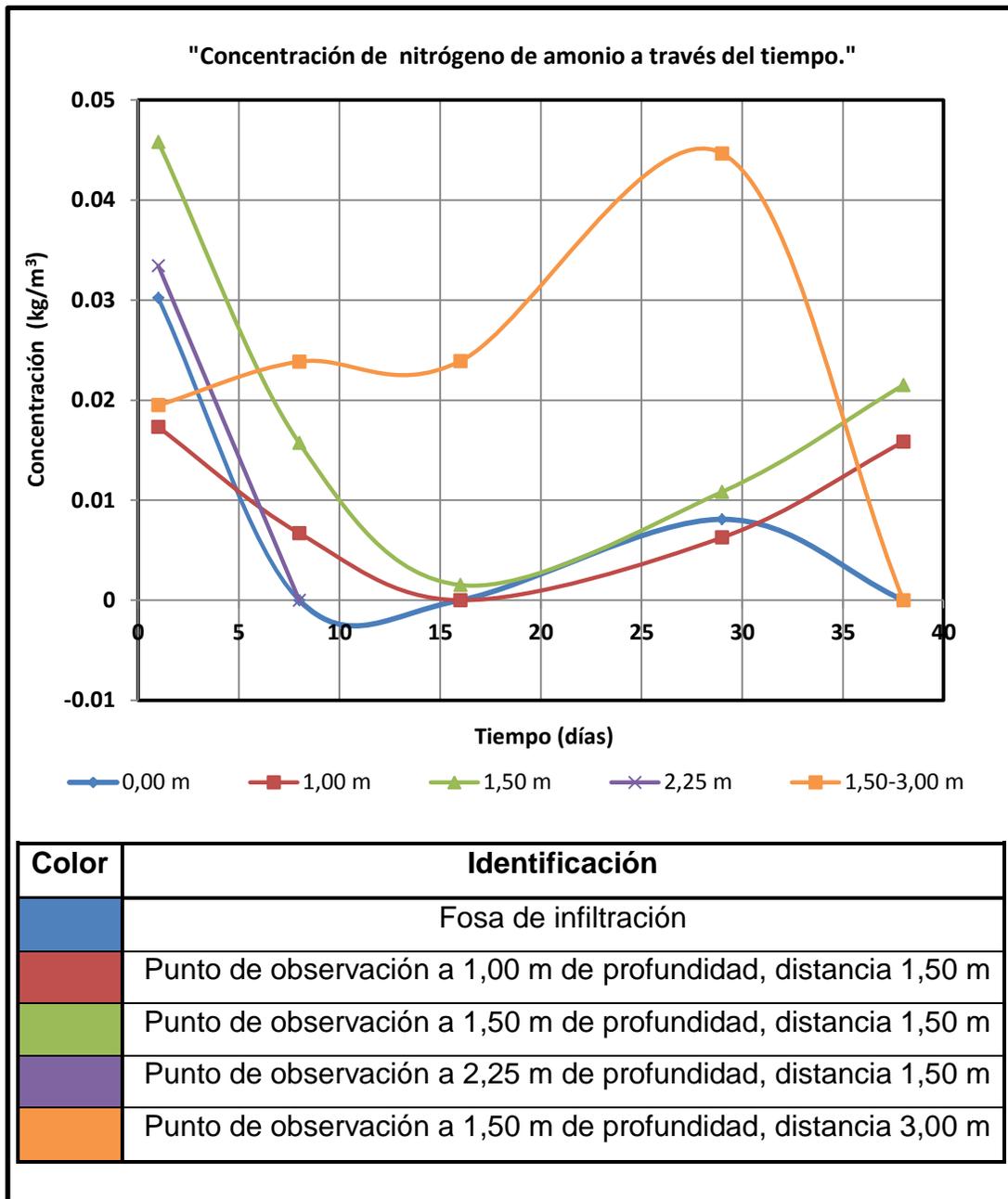
A continuación se presentan las variaciones en la concentración de nitrógeno de amonio, nitrógeno de nitritos, nitrógeno de nitratos y nitrógeno total, expresados en kg/m^3 .

Figura 28. **Concentración de nitrógeno total, en los puntos diferentes puntos de monitoreo, en función del tiempo**



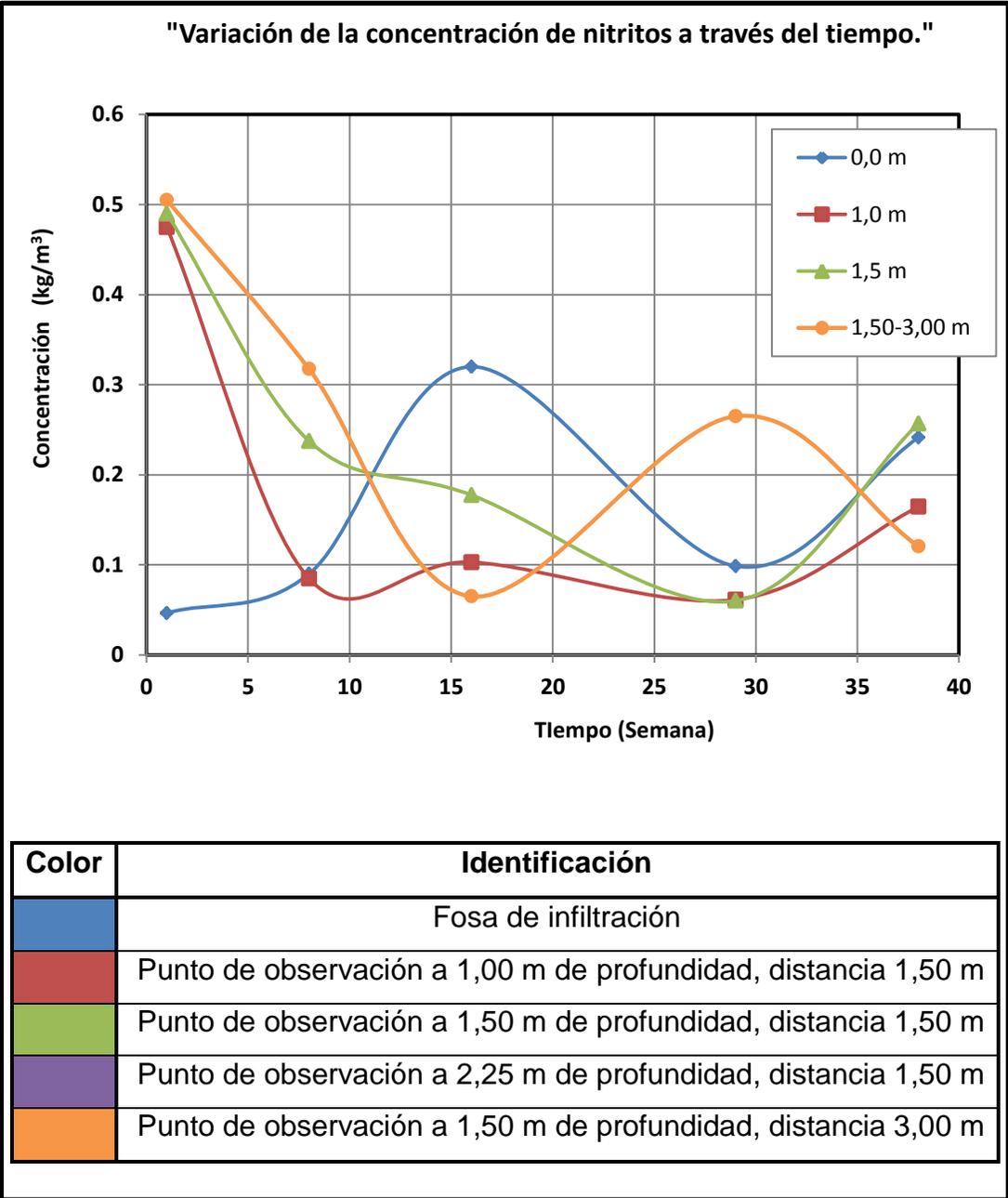
Fuente: elaboración propia.

Figura 29. **Variación de la concentración de nitrógeno de amonio, en los diferentes puntos de observación de la fosa No.7 en función del tiempo**



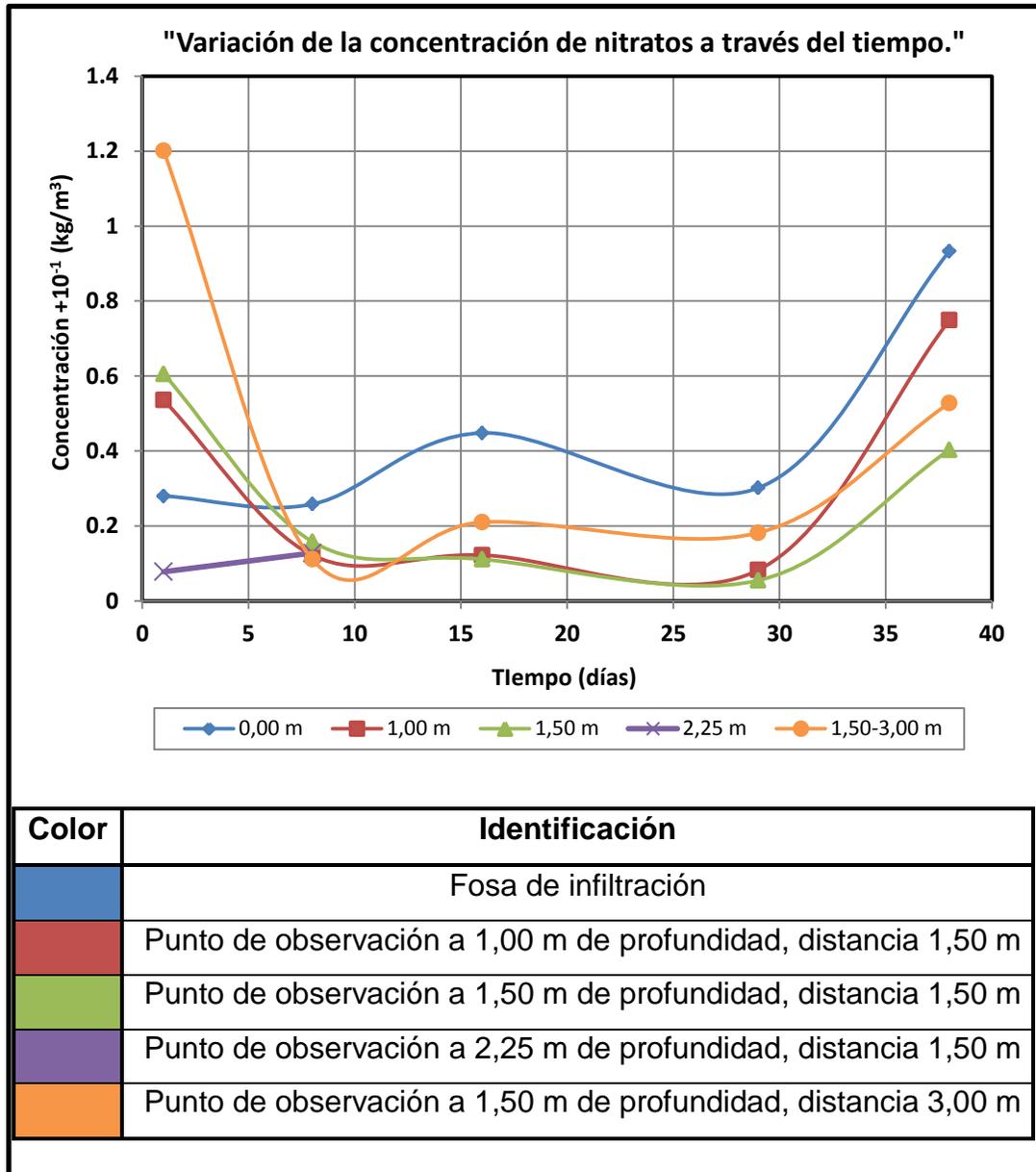
Fuente: elaboración propia.

Figura 30. **Variación de la concentración de nitritos, en los diferentes puntos de monitoreo de la fosa No.7 en función del tiempo**



Fuente: elaboración propia.

Figura 31. **Variación de la concentración de nitratos, en los diferentes puntos de observación de la fosa No. 7 en función del tiempo**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIV. **Análisis de varianza para el nitrógeno total, entre los diferentes puntos de observación de la fosa No. 7 en función del tiempo**

F.V.	G.L.	S.C.	C.M.	F	P	Criterio										
Modelo	6	14,80	2,47	1,60	0,1958	Se acepta H ₀										
D (m)	1	0,23	0,23	0,15	0,7022	Se acepta H ₀										
P (m)	3	2,41	0,80	0,52	0,6719	Se acepta H ₀										
D*P	1	0,21	0,21	0,14	0,7155	Se acepta H ₀										
t (días)	1	11,95	11,95	7,76	0,0111	Se rechaza H ₀										
Error	21	32,34	1,54	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Variable</th> <th>N</th> <th>R²</th> <th>R² Aj</th> <th>CV</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Ntotal</td> <td>28</td> <td>0.31</td> <td>0.12</td> <td>124.62</td> </tr> </tbody> </table>			Variable	N	R ²	R ² Aj	CV	Ntotal	28	0.31	0.12	124.62
Variable	N	R ²	R ² Aj				CV									
Ntotal	28	0.31	0.12	124.62												
Total	27	47,14														

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXV. **Análisis de varianza para el nitrógeno de amonio, entre los diferentes puntos de observación de la fosa No. 7 en función del tiempo**

F.V.	G.L.	S.C.	C.M.	F	P	Criterio										
Modelo	6	1,3*10 ⁻³	2,1*10 ⁻⁴	1,07	0,4113	Se acepta H ₀										
D (m)	1	3,9*10 ⁻⁵	3,9*10 ⁻⁵	0,19	0,6640	Se acepta H ₀										
P (m)	3	7,5*10 ⁻⁴	2,5*10 ⁻⁴	1,25	0,3173	Se acepta H ₀										
D*P	1	3,4*10 ⁻⁸	3,4*10 ⁻⁸	1,7*10 ⁻⁴	0,9896	Se acepta H ₀										
t (días)	1	4,9*10 ⁻⁴	4,9*10 ⁻⁴	2,48	0,1308	Se acepta H ₀										
Error	20	4,0*10 ⁻³	2,0*10 ⁻⁴	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Variable</th> <th>N</th> <th>R²</th> <th>R² Aj</th> <th>CV</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Amonio</td> <td>27</td> <td>0.24</td> <td>0.02</td> <td>104.78</td> </tr> </tbody> </table>			Variable	N	R ²	R ² Aj	CV	Amonio	27	0.24	0.02	104.78
Variable	N	R ²	R ² Aj				CV									
Amonio	27	0.24	0.02	104.78												
Total	26	0,01	-													

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVI. **Análisis de varianza para el nitrógeno de nitratos, entre los diferentes puntos de observación de la fosa No. 7**

F.V.	G.L.	S.C.	C.M.	F	P	Criterio										
Modelo	6	0,35	0,06	0,58	0,7415	Se acepta H ₀										
D (m)	1	0,11	0,11	1,06	0,3150	Se acepta H ₀										
P (m)	3	0,11	0,04	0,39	0,7639	Se acepta H ₀										
D*P	1	0,09	0,09	0,96	0,3397	Se acepta H ₀										
Tiempo (días)	1	0,03	0,03	0,31	0,5865	Se acepta H ₀										
Error	20	1,98	0,10	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Variable</th> <th>N</th> <th>R²</th> <th>R² Aj</th> <th>CV</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Nitratos</td> <td>27</td> <td>0.15</td> <td>0.00</td> <td>86.58</td> </tr> </tbody> </table>			Variable	N	R ²	R ² Aj	CV	Nitratos	27	0.15	0.00	86.58
Variable	N	R ²	R ² Aj				CV									
Nitratos	27	0.15	0.00	86.58												
Total	26	2,33	-													

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVII. **Análisis de varianza para el nitrógeno de nitritos, entre los diferentes puntos de observación de la fosa No. 7**

F.V.	G.L.	S.C.	C.M.	F	P	Criterio										
Modelo	6	0,12	0,02	0,99	0,4598	Se acepta H ₀										
D (m)	1	7,0*10 ⁻⁴	7,0*10 ⁻⁴	0,04	0,8524	Se acepta H ₀										
P (m)	3	0,07	0,02	1,6	0,3163	Se acepta H ₀										
D*P	1	0,01	0,01	0,33	0,5729	Se acepta H ₀										
Tiempo (días)	1	0,04	0,04	1,79	0,1955	Se acepta H ₀										
Error	20	0,40	0,02	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Variable</th> <th>N</th> <th>R²</th> <th>R² Aj</th> <th>CV</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Nitritos</td> <td>27</td> <td>0.23</td> <td>0.00</td> <td>70.21</td> </tr> </tbody> </table>			Variable	N	R ²	R ² Aj	CV	Nitritos	27	0.23	0.00	70.21
Variable	N	R ²	R ² Aj				CV									
Nitritos	27	0.23	0.00	70.21												
Total	26	0,51	-													

Fuente: elaboración propia.

5.3.2. Concentración del nitrógeno y sus especies en el suelo

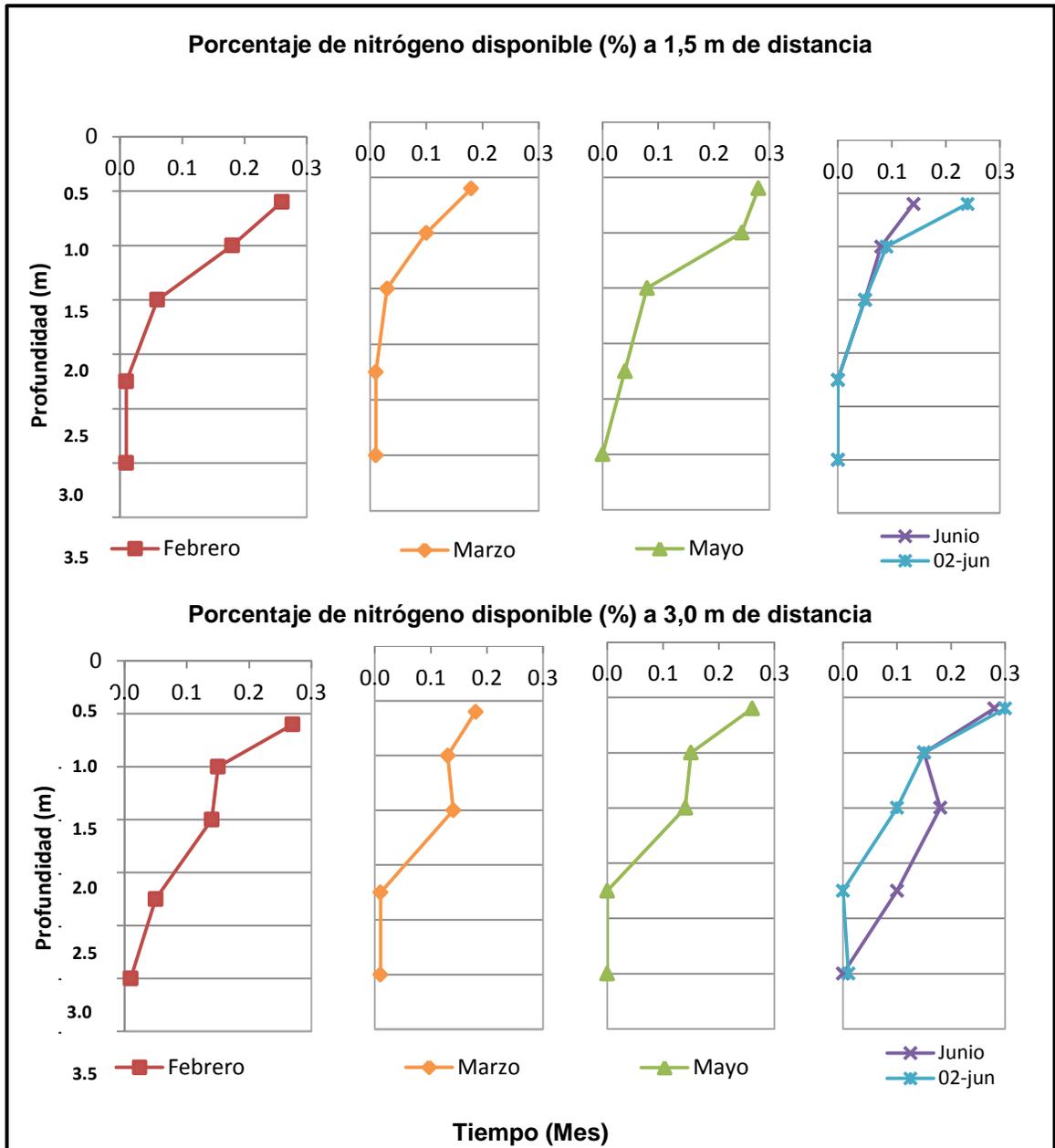
El análisis de la química del suelo expresa las variaciones del nitrógeno y sus especies. Las variaciones en la concentración de nitrógeno de amonios y de nitratos son expresadas en kg/m^3 , mientras que el nitrógeno total se expresa como porcentaje de nitrógeno disponible para la planta. Para cada gráfica es posible observar los siguientes aspectos comunes:

- Eje de las abscisas: para el agua infiltrada se representa el tiempo en semanas. Para el suelo, se observa el porcentaje de nitrógeno.
- Eje de las ordenadas: para el agua infiltrada se representa la concentración del parámetro de interés. En el caso del suelo, se representa la profundidad.
- Tabla descriptiva: relaciona el período en el cual fue tomada la muestra con el color representado en la gráfica.

5.3.2.1. Porcentaje de nitrógeno disponible

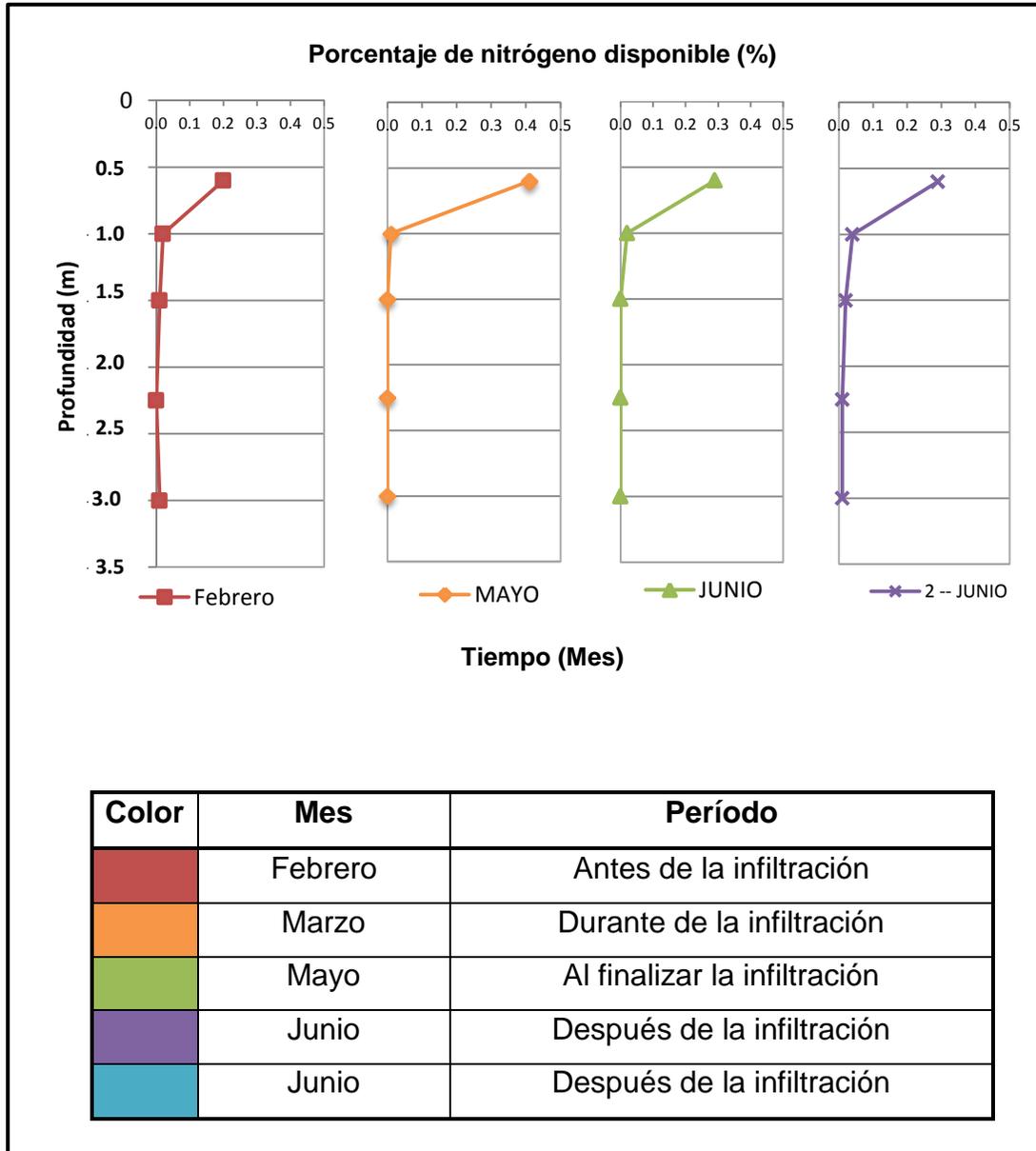
El nitrógeno analizado en el laboratorio corresponde al porcentaje de nitrógeno disponible para ser utilizado por las plantas.

Figura 32. **Variación del nitrógeno disponible a diferentes profundidades, a 1,5 y 3,0 m de distancia desde la fosa No. 7**



Fuente: elaboración propia.

Figura 33. **Porcentaje de nitrógeno disponible a diferentes profundidades en la calicata No. 3 testigo, en función del tiempo**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVIII. **Análisis de varianza para el porcentaje de nitrógeno disponible, entre los diferentes puntos de observación en el suelo**

F.V.	G.L.	S.C.	C.M.	F	P	Criterio										
Modelo	10	0,39	0,04	26,36	<0,0001	Se rechaza H ₀										
D (m)	4	0,01	0,01	7,89	0,0077	Se rechaza H ₀										
P (m)	1	0,36	0,09	61,93	<0,0001	Se rechaza H ₀										
D*P	4	0,01	2,9*10 ⁻³	1,99	0,9556	Se acepta H ₀										
T (días)	1	4,6*10 ⁻⁶	4,6*10 ⁻⁶	3,1*10 ⁻³	0,1153	Se acepta H ₀										
Error	39	0,06	1,5*10 ⁻³	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Variable</th> <th>N</th> <th>R²</th> <th>R² Aj</th> <th>CV</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Concentración (%)</td> <td>50</td> <td>0,87</td> <td>0,84</td> <td>37,81</td> </tr> </tbody> </table>			Variable	N	R ²	R ² Aj	CV	Concentración (%)	50	0,87	0,84	37,81
Variable	N	R ²	R ² Aj	CV												
Concentración (%)	50	0,87	0,84	37,81												
Total	49	0,44	-	Son significativamente diferentes si P<0.05												

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIX. **Prueba de Tuckey, para el porcentaje de nitrógeno disponible, a diferentes distancias**

Distancia (m)	Medias	E.E.	Grupo
1,50	0,09	0,01	A
3,00	0,12	0,01	B
DMS: 0,02189. Son significativamente diferentes con P<0.05			

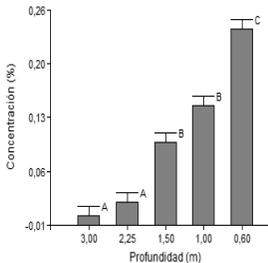
Concentración (%)

Distancia (m)

Fuente: elaboración propia.

Tabla XL. **Prueba de Tuckey, para el porcentaje de nitrógeno disponible, a diferentes profundidades**

Profundidad (m)	Medias	E.E.	Grupo
3,00	0,01	0,01	A
2,25	0,0	0,01	A
1,50	0,10	0,01	B
1,00	0,14	0,01	B
0,60	0,24	0,01	C



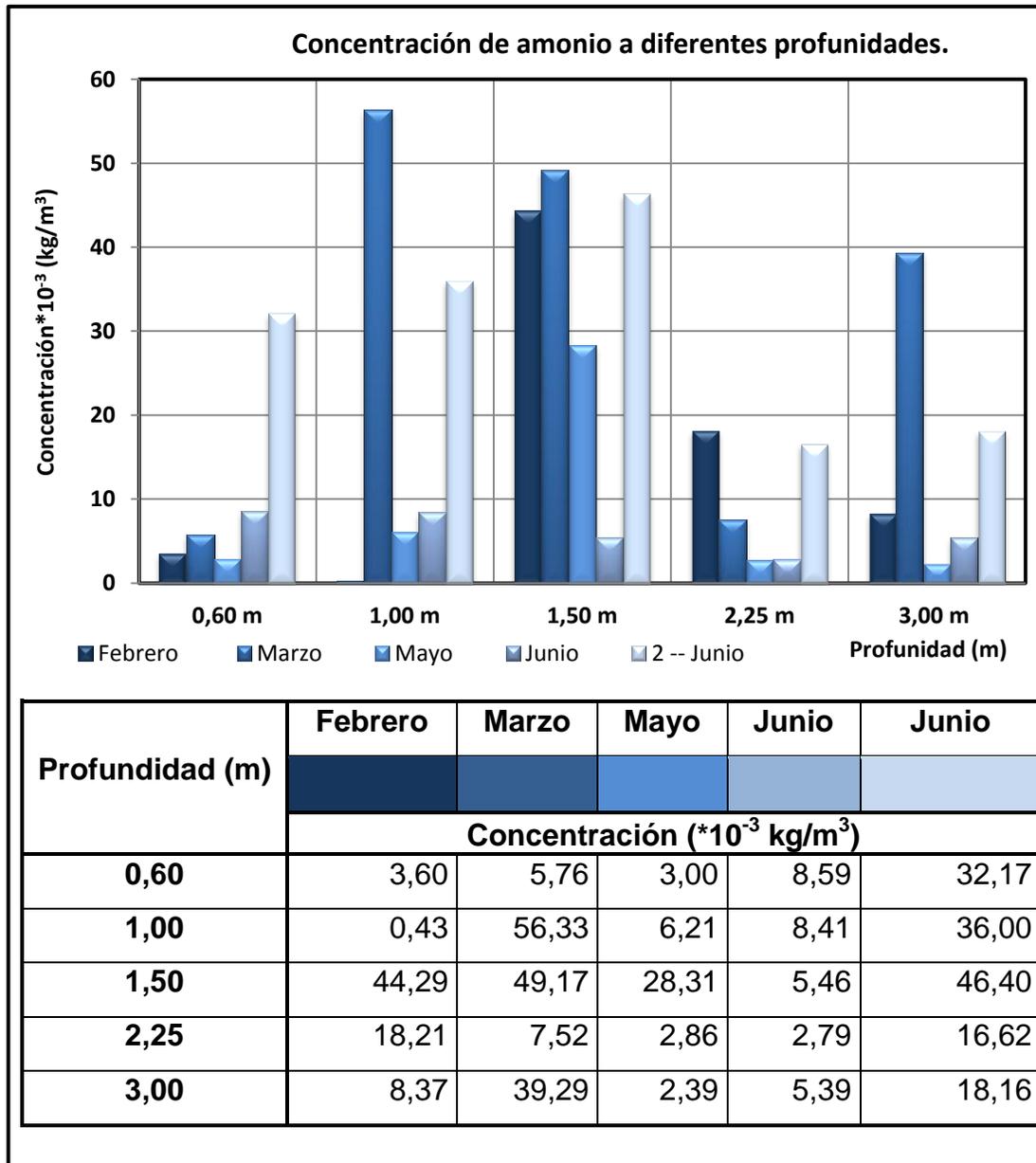
Son significativamente diferentes
si $P < 0.05$

Fuente: elaboración propia.

5.3.2.2. **Variación de la concentración de amonio en el suelo, en función del tiempo y análisis de varianza**

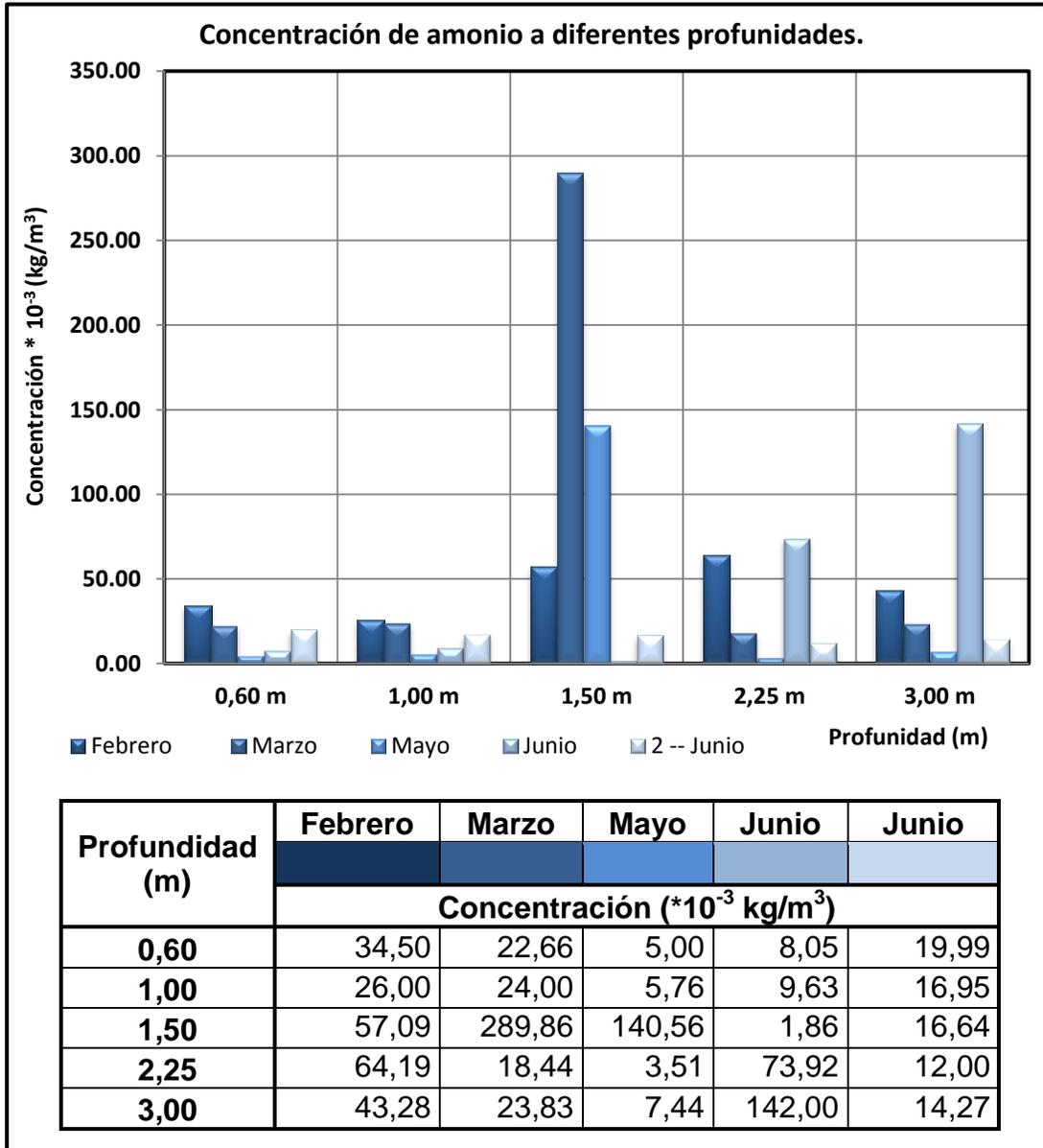
El nitrógeno de amonio puede ser absorbido por: la planta, los minerales arcillosos o la materia orgánica. Asimismo, puede ser inmovilizado por microorganismos. A continuación se presentan las variaciones en los diferentes estratos a 1,50 m y 3,0 m de distancia y en la calicata testigo.

Figura 34. Variación de la concentración de amonio, a diferentes profundidades en la calicata No. 1, 1,50 m de distancia de la fosa No. 7 en función del tiempo



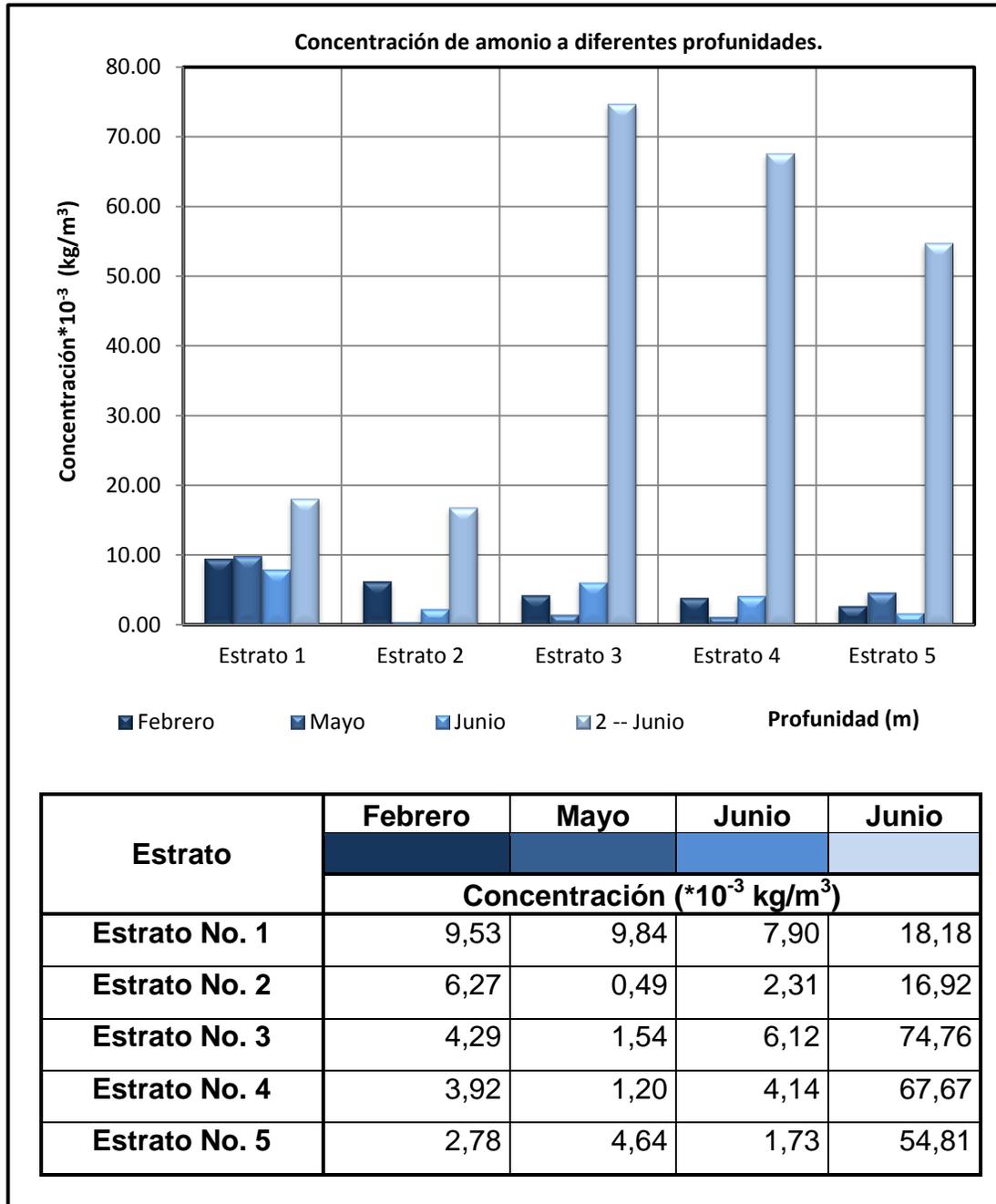
Fuente: elaboración propia.

Figura 35. Variación de la concentración de amonio, a diferentes profundidades en la calicata No. 1, 3,00 m de distancia de la fosa No. 7 en función del tiempo



Fuente: elaboración propia.

Figura 36. **Variación de la concentración de amonio en función del tiempo, a diferentes profundidades en la calicata testigo**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XLI. **Análisis de varianza para el amonio, entre los diferentes puntos de observación en el suelo. Si $P < 0.05$ entonces son significativamente diferente.**

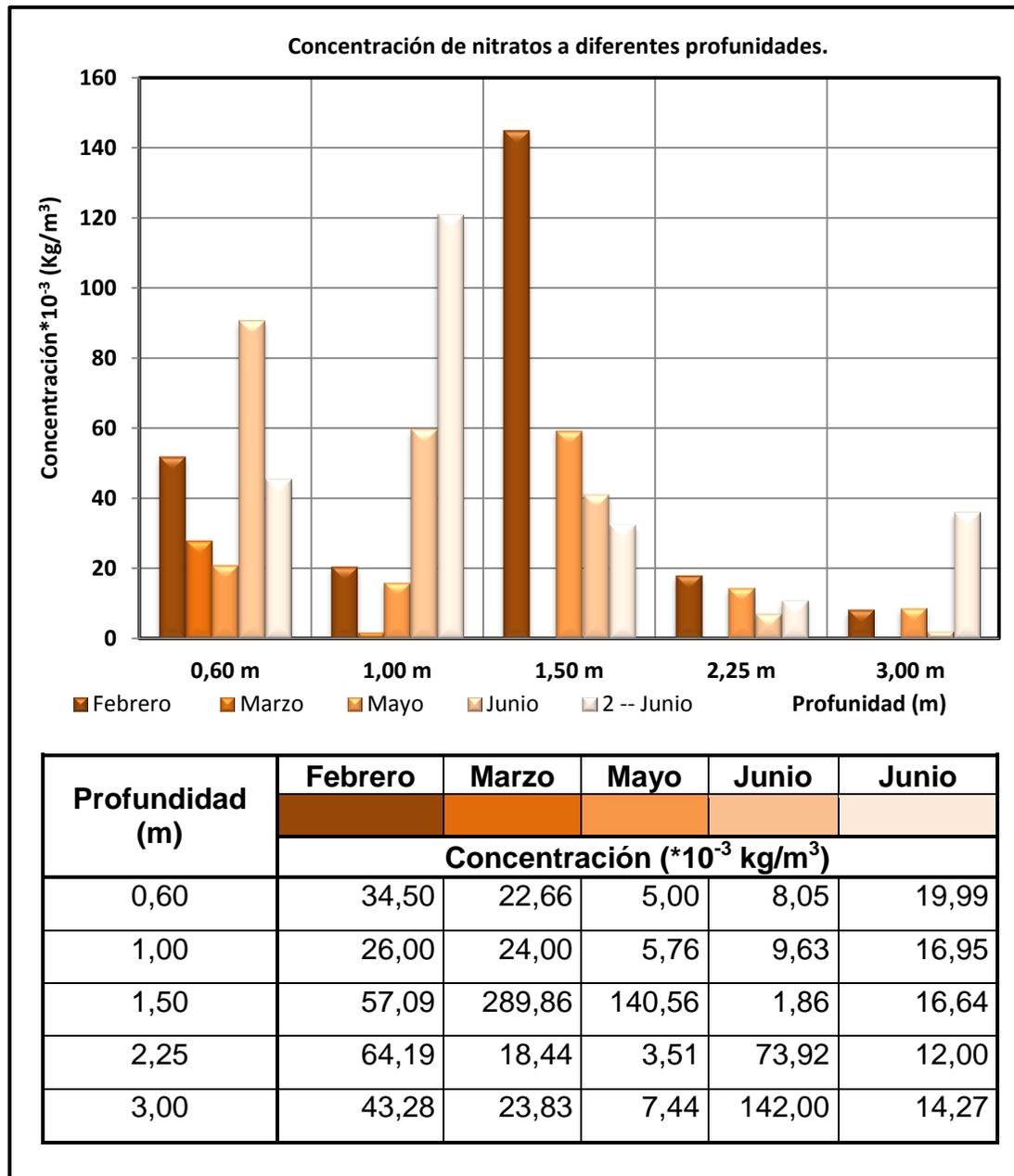
F.V.	G.L.	S.C.	C.M.	F	P	Criterio										
Modelo	10	35732,62	35732,26	1,82	0,0900	Se acepta H_0										
Distancia (m)	1	7795,01	7795,01	3,96	0,0537	Se acepta H_0										
Profundidad (m)	4	18696,57	4674,14	2,37	0,0688	Se acepta H_0										
Interacción D*P	4	7513,22	1878,30	0,89	0,4436	Se acepta H_0										
Tiempo (días)	1	1747,82	1747,82	0,95	0,3519	Se acepta H_0										
Error	39	76799,42	1969,22	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Variable</th> <th>N</th> <th>R²</th> <th>R² Aj</th> <th>CV</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>NH₄ (mg/L)</td> <td>50</td> <td>0,32</td> <td>0,14</td> <td>144,21</td> </tr> </tbody> </table>			Variable	N	R ²	R ² Aj	CV	NH ₄ (mg/L)	50	0,32	0,14	144,21
Variable	N	R ²	R ² Aj				CV									
NH ₄ (mg/L)	50	0,32	0,14	144,21												
Total	49	112552,04	-													

Fuente: elaboración propia.

5.3.2.3. Variación de la concentración de nitratos en el suelo, en función del tiempo

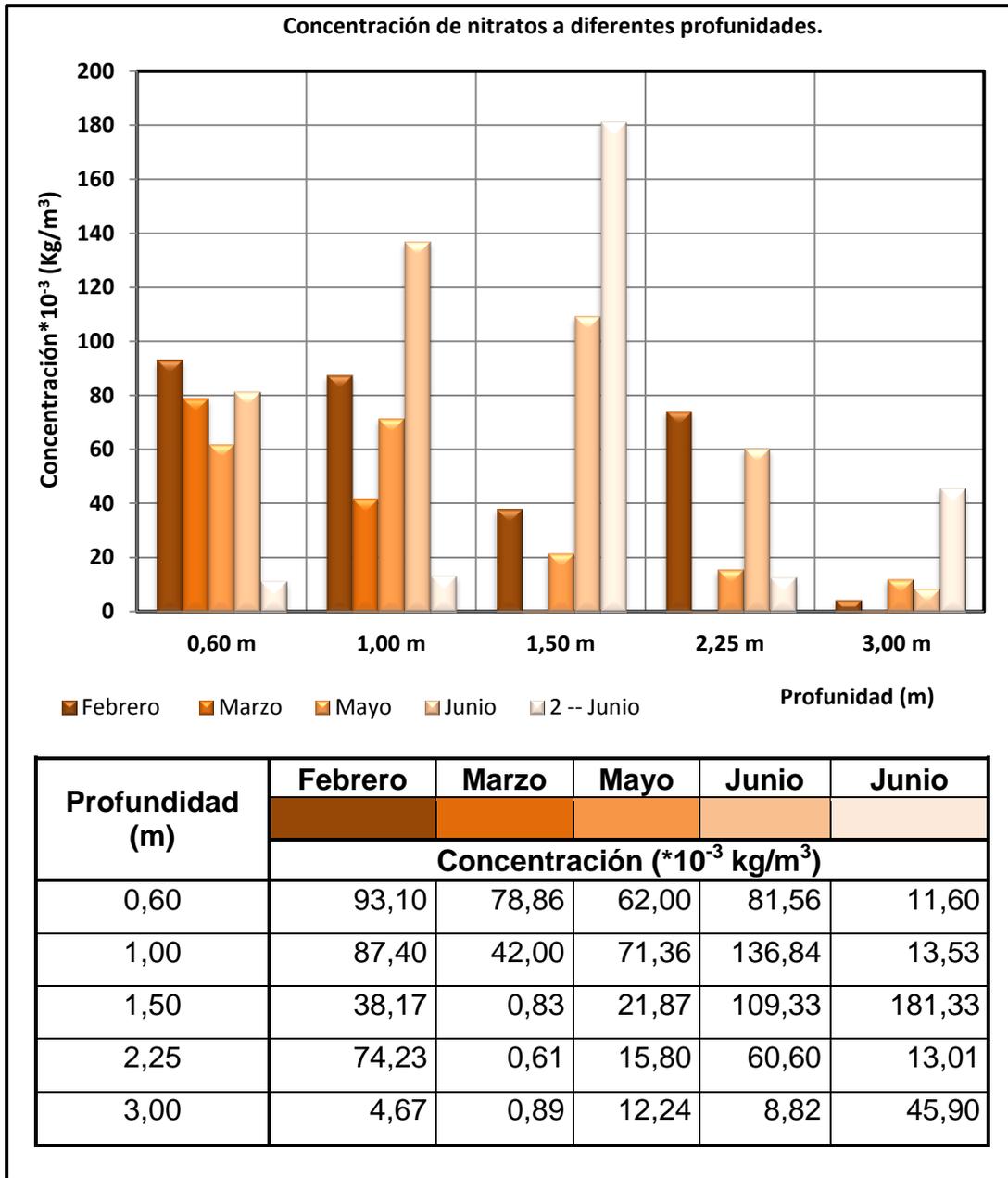
Los nitratos son fácilmente asimilables por las plantas y debe prestarse especial atención en su aprovechamiento.

Figura 37. **Variación de la concentración de nitratos a diferentes profundidades en la calicata No. 1, 1,50 m de distancia de la fosa No. 7 en función del tiempo**



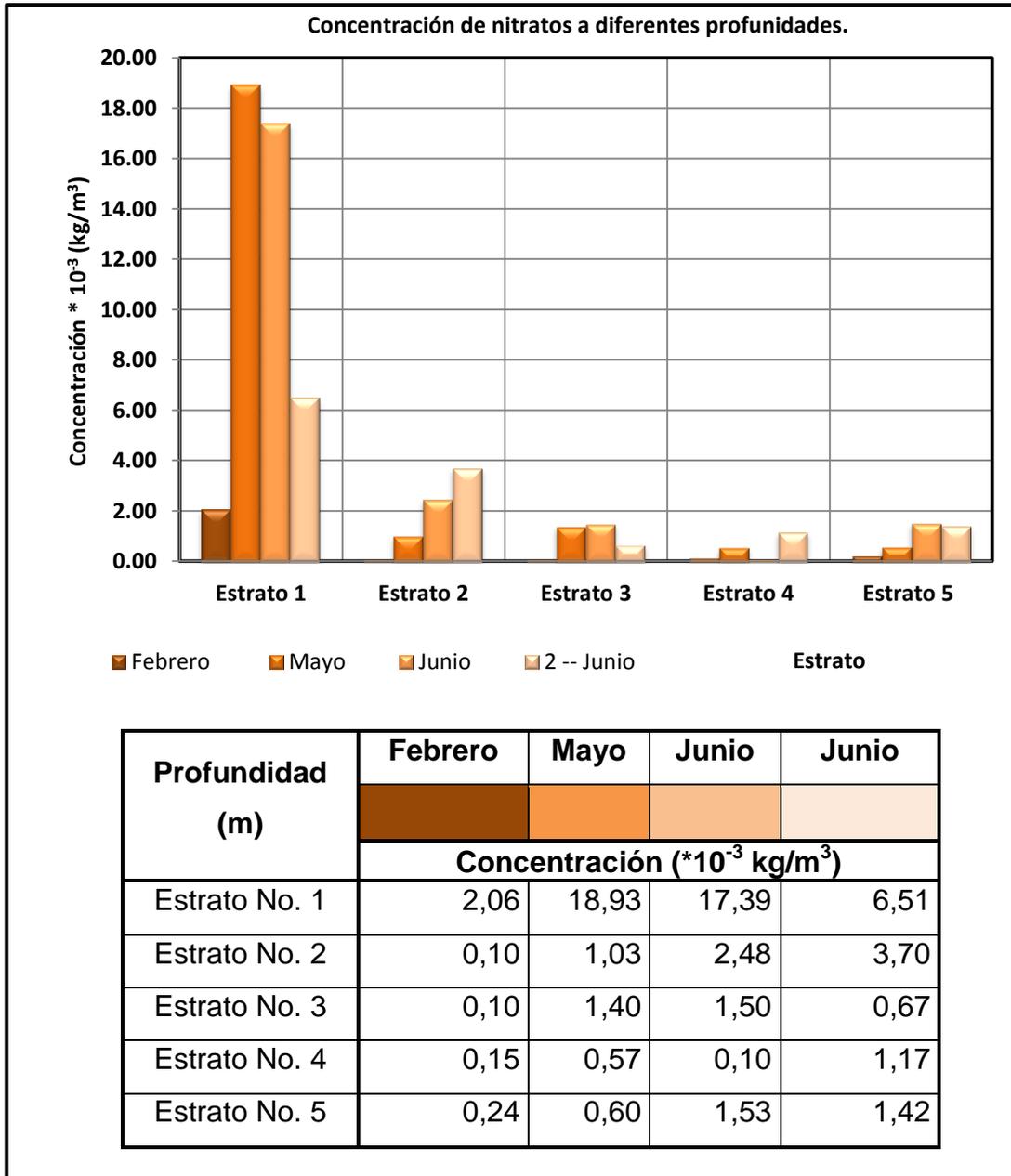
Fuente: elaboración propia.

Figura 38. **Variación de la concentración de nitratos a diferentes profundidades en la calicata No. 1, 3,00 m de distancia de la fosa No. 7 en función del tiempo**



Fuente: elaboración propia.

Figura 39. **Variación de la concentración de nitratos a diferentes profundidades en la calicata testigo en función del tiempo**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XLII. **Análisis de varianza para el nitrato, entre los diferentes puntos de observación en el suelo. Si $P < 0.05$ son significativamente diferentes**

F.V.	G.L.	S.C.	C.M.	F	P	Criterio										
Modelo	10	27376,18	2737,62	1,67	0,1236	Se acepta H_0										
D (m)	1	3627,13	3627,13	2,21	0,1451	Se acepta H_0										
P (m)	4	21440,85	5360,21	3,27	0,0210	Se rechaza H_0										
D*P	4	778,95	194,74	0,12	0,9751	Se acepta H_0										
t (días)	1	1529,25	1529,25	0,93	0,3403	Se acepta H_0										
Error	39	63993,48	1640,86	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Variable</th> <th>N</th> <th>R²</th> <th>R² Aj</th> <th>CV</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>NO3 (mg/L)</td> <td>50</td> <td>0,30</td> <td>0,12</td> <td>96,12</td> </tr> </tbody> </table>			Variable	N	R ²	R ² Aj	CV	NO3 (mg/L)	50	0,30	0,12	96,12
Variable	N	R ²	R ² Aj				CV									
NO3 (mg/L)	50	0,30	0,12	96,12												
Total	49	91369,66	-													

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLIII. **Prueba de Tuckey para la variación del nitrato en las diferentes profundidades**

Profundidad (m)	Medias	E.E.	Grupo
3,00	12,80	12,81	A
2,25	21,53	12,81	A
1,50	62,95	12,81	A
1,00	57,02	12,81	A
0,60	56,42	12,81	A
DMS: 51,80101. Son significativamente diferentes con $P > 0.05$			

Profundidad (m)	Medias (mg/L)
3,00	12,80
2,25	21,53
0,60	56,42
1,00	57,02
1,50	62,95

Fuente: elaboración propia.

5.4. Concentración de fósforo total en el agua de infiltración y en el suelo

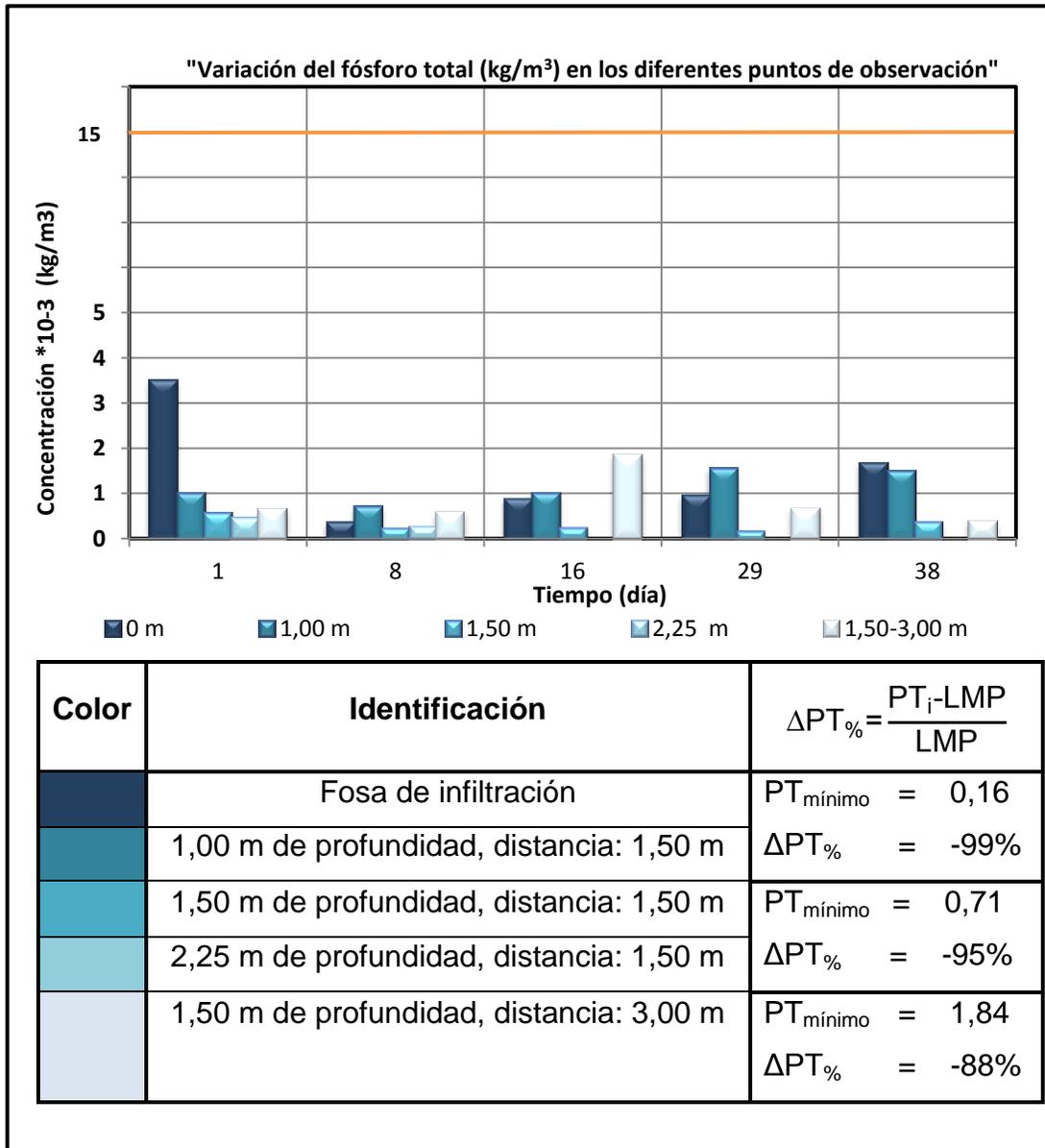
De la figura 40 a la 43 se representan las variaciones en la concentración de fósforo, tanto en el agua infiltrada como en el suelo. Se describe el análisis estadístico aplicado para la comprobación de la hipótesis, en los casos donde fue rechazada se presenta la prueba de Tuckey. Para cada gráfica es posible observar los siguientes aspectos comunes:

- Eje de las abscisas: para el agua infiltrada se representa el tiempo en semanas. Para el suelo se observa la concentración de fósforo disponible.
- Eje de las ordenadas: para el agua infiltrada se representa la concentración del parámetro de interés. En el caso del suelo se representa la profundidad.
- Límite máximo permisible: es representado por la línea horizontal de color naranja. En el caso del pH, el LM_iP se representa por una línea color rojo.
- Tabla descriptiva: identifica cada punto de monitoreo con su color respectivo. Asimismo presenta la diferencia porcentual entre el LMP establecido en el AG 12-2011 y el valor mínimo, máximo y promedio para ambos períodos.

5.4.1. Variación de la concentración de fósforo total en el agua infiltrada

La concentración de fósforo en el agua infiltrada se representa en función del tiempo en un gráfico de barras.

Figura 40. **Concentración del fósforo total (kg/m³), a diferentes profundidades y distancias de la fosa No. 7 en función del tiempo**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XLIV. **Análisis de varianza para el fosforo total entre los diferentes puntos de observación en el agua**

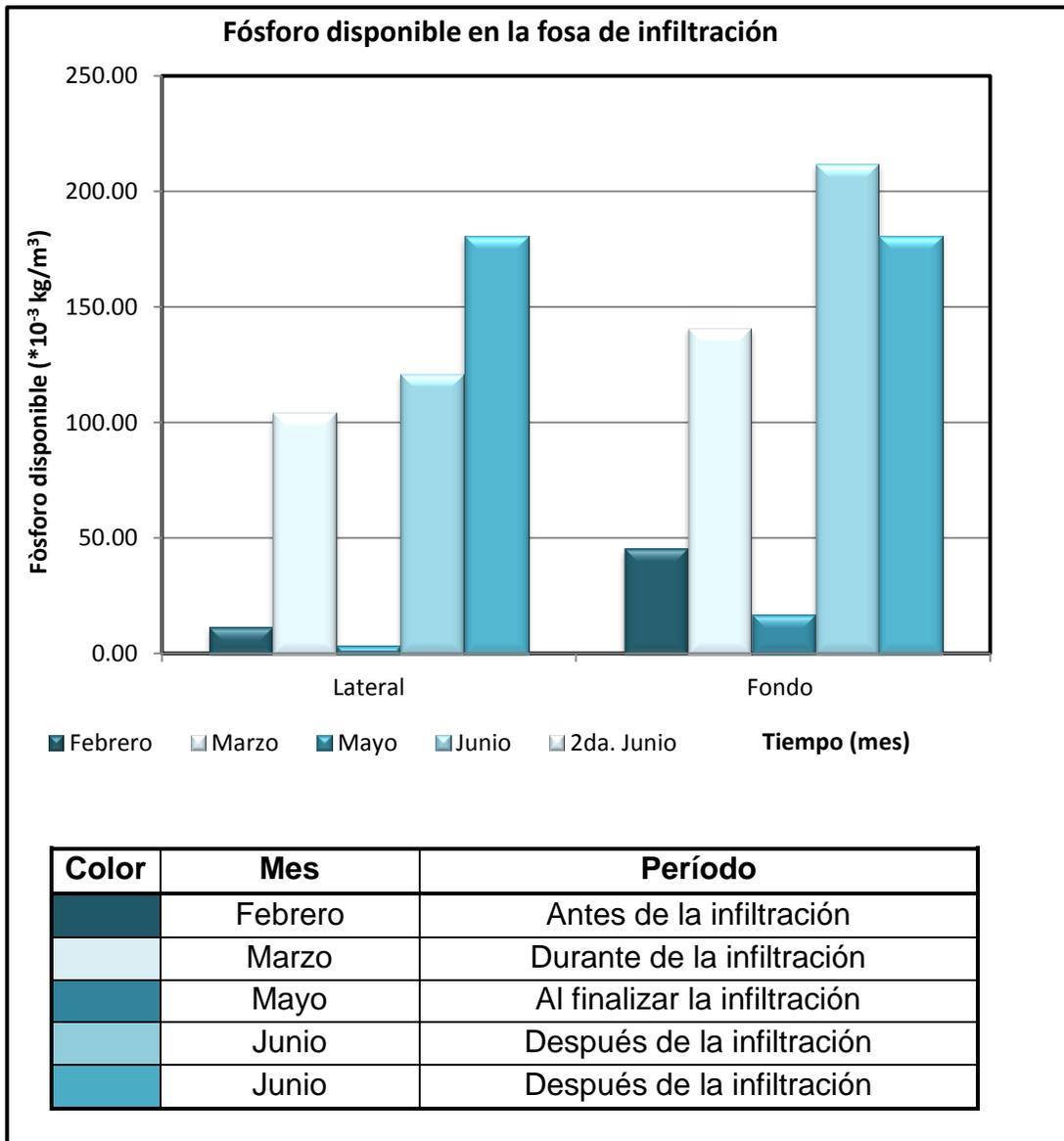
F.V.	G.L.	S.C.	C.M.	F	P	Criterio										
Modelo	6	$6,1 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	1,50	0,2291	Se acepta H_0										
Distancia (m)	1	$3,8 \cdot 10^{-7}$	$3,8 \cdot 10^{-7}$	0,56	0,4631	Se acepta H_0										
Profundidad (m)	3	$5,0 \cdot 10^{-6}$	$1,7 \cdot 10^{-6}$	2,48	0,0907	Se acepta H_0										
Interacción D*P	1	$3,3 \cdot 10^{-7}$	$3,3 \cdot 10^{-7}$	0,51	0,4923	Se acepta H_0										
Tiempo (días)	1	$3,4 \cdot 10^{-7}$	$3,4 \cdot 10^{-7}$	0,49	0,4848	Se acepta H_0										
Error	20	$1,3 \cdot 10^{-5}$	$6,7 \cdot 10^{-7}$	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Variable</th> <th>N</th> <th>R²</th> <th>R² Aj</th> <th>CV</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>P (kg/m³)</td> <td>27</td> <td>0.31</td> <td>0.10</td> <td>82.40</td> </tr> </tbody> </table>			Variable	N	R ²	R ² Aj	CV	P (kg/m ³)	27	0.31	0.10	82.40
Variable	N	R ²	R ² Aj				CV									
P (kg/m ³)	27	0.31	0.10	82.40												
Total	26	$2,0 \cdot 10^{-6}$														

Fuente: elaboración propia.

5.4.2. Concentración de fósforo disponible en el suelo

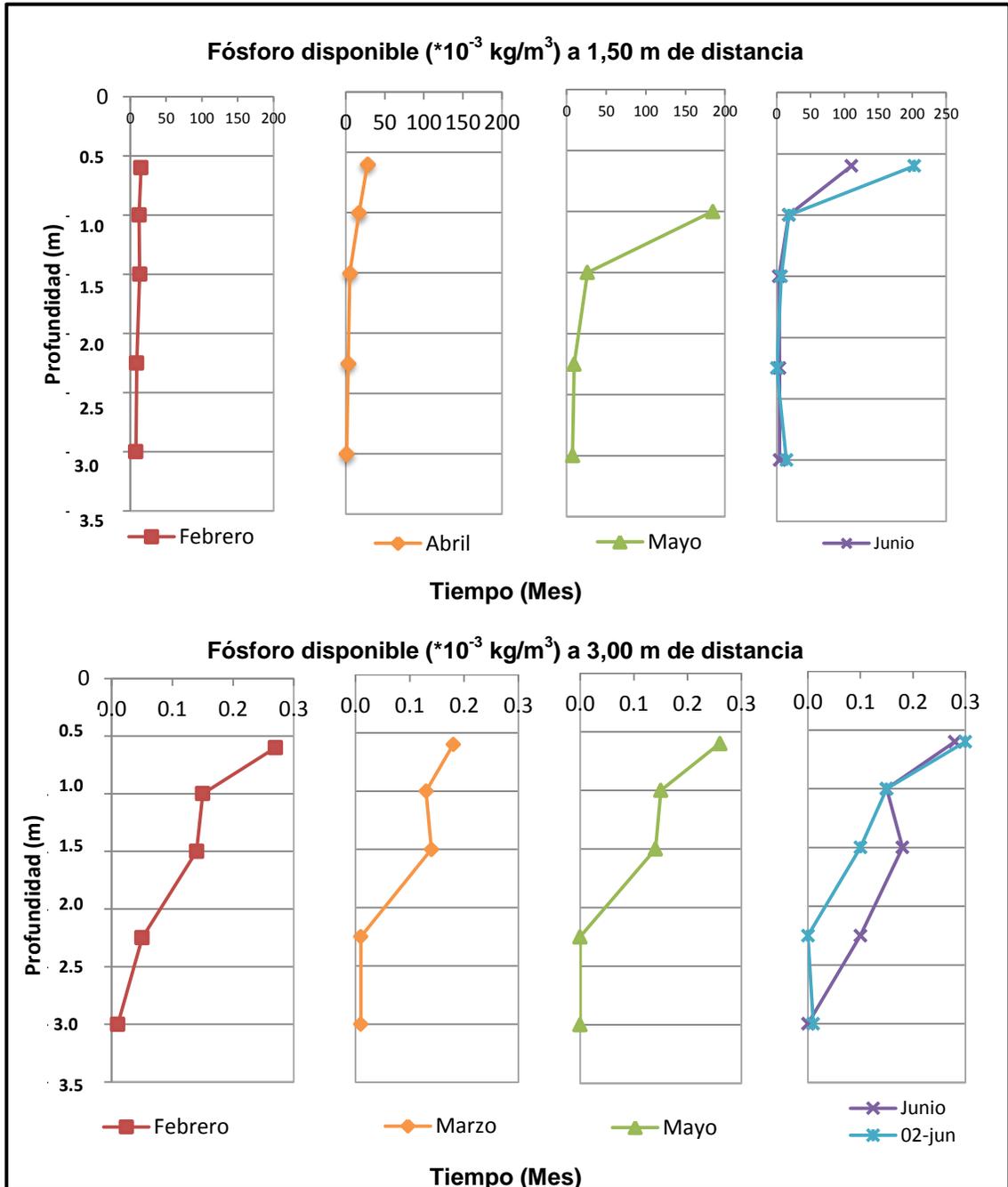
A continuación se presenta la variación en la concentración de fósforo disponible para la planta.

Figura 41. **Concentración de fósforo disponible en el suelo de la fosa de infiltración No. 7 en función del tiempo**



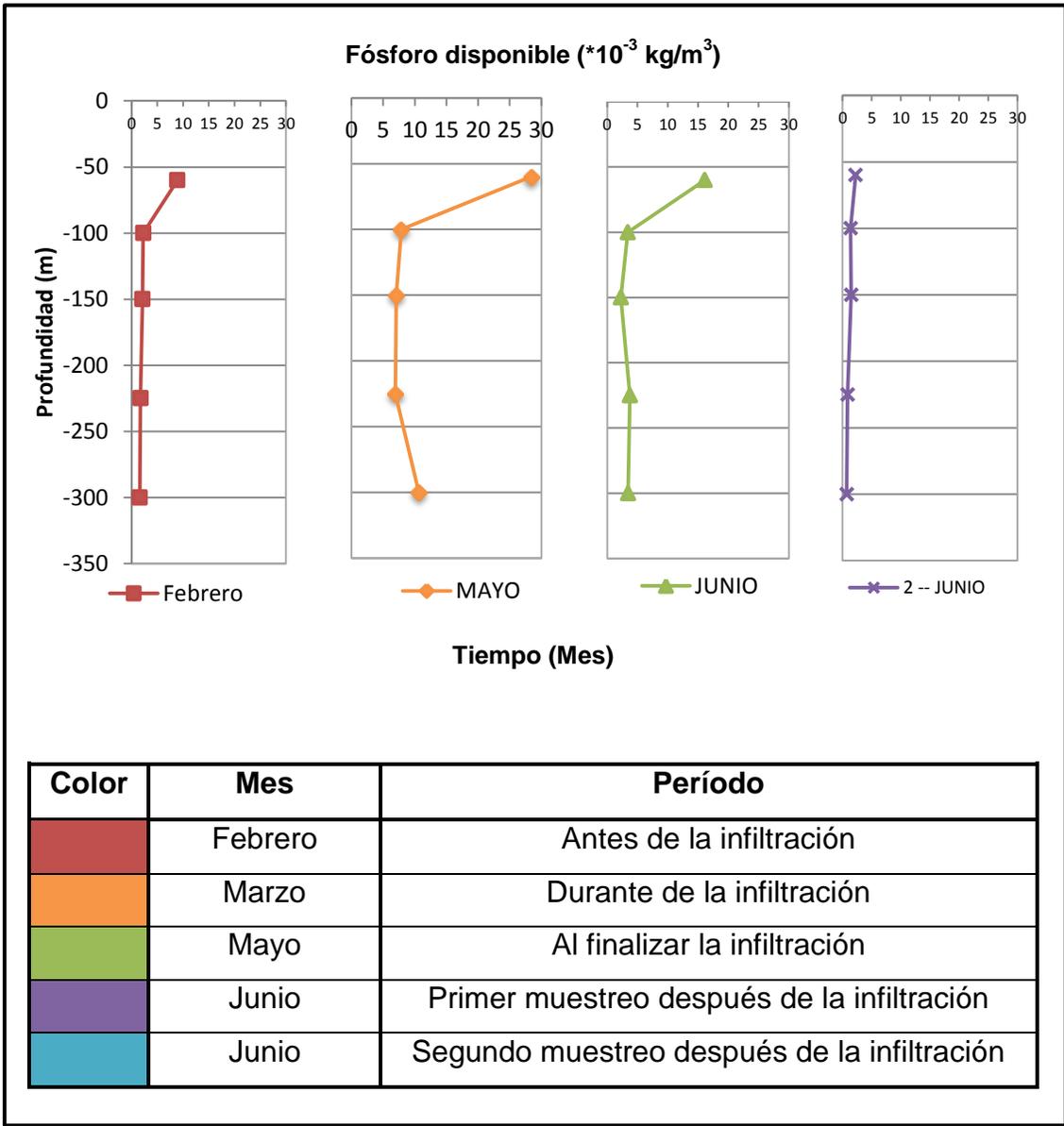
Fuente: elaboración propia

Figura 42. **Concentración de fósforo disponible a diferentes profundidades, 1,5 y 3,0 m de distancia desde la fosa 7**



Fuente: elaboración propia.

Figura 43. **Concentración de fósforo disponible en la calicata testigo a diferentes profundidades, en función del tiempo**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XLV. **Análisis de varianza para el fosforo disponible en los diferentes puntos de observación en el suelo, son significativamente diferentes si $P < 0.05$**

F.V.	G.L.	S.C.	C.M.	F	P	Criterio										
Modelo	10	155537,55	15553,75	8,87	<0,0001	Se rechaza H_0										
Distancia (m)	1	21007,17	21007,17	11,98	0,0013	Se rechaza H_0										
Profundidad (m)	4	119327,31	29831,83	17,01	<0,0001	Se rechaza H_0										
Interacción D*P	4	11416,36	2854,09	1,63	0,1867	Se acepta H_0										
Tiempo (días)	1	3786,71	3786,71	2,16	0,1497	Se acepta H_0										
Error	39	68383,21	1753,42	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Variable</th> <th>N</th> <th>R²</th> <th>R² Aj</th> <th>CV</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>P (%)</td> <td>50</td> <td>0,69</td> <td>0,62</td> <td>73,50</td> </tr> </tbody> </table>			Variable	N	R ²	R ² Aj	CV	P (%)	50	0,69	0,62	73,50
Variable	N	R ²	R ² Aj				CV									
P (%)	50	0,69	0,62	73,50												
Total	49	223920,75	-													

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLVI. **Prueba de Tuckey para la variación del fosforo disponible en las diferentes distancias**

Distancia (m)	Medias	E.E.	Grupo
3,00	36,48	8,37	A
1,50	77,4	8,37	B
DMS: 23,95615			
Son significativamente diferentes a $P < 0.05$			

The bar chart displays phosphorus availability (P (%)) on the y-axis (ranging from 34,01 to 88,31) against distance (m) on the x-axis. Two bars are shown: one for 1,5m (Group A) and one for 3,0m (Group B). The 3,0m bar is significantly higher than the 1,5m bar.

Distancia (m)	Medias	E.E.	Grupo
3,00	36,48	8,37	A
1,50	77,4	8,37	B

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLVII. **Prueba de Tuckey para la variación del fósforo disponible en las diferentes profundidades**

Profundidad (m)	Medias	E.E.	Grupo
3,00	7,53	13,24	A
2,25	11,18	13,24	A
1,50	40,88	13,24	A B
1,00	91,00	13,24	B C
0,60	134,27	13,24	C

DMS: 53,54823.			
Son significativamente diferentes si $P < 0.05$			

Profundidad (m)	Medias (P %)	Significado
3,00	7,53	A
2,25	11,18	A
1,50	40,88	AB
1,00	91,00	BC
0,60	134,27	C

Fuente: elaboración propia.

6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Para realizar la evaluación del transporte de contaminantes se estableció un emplazamiento ubicado a 550 m de distancia desde el lago de Atitlán con una pendiente moderada del 8%, de una serie de 12 fosas de infiltración, la fosa en estudio fue la No. 7 (ver anexo). Se identificaron dos calicatas: una ubicada a 1,50 m de distancia y otra testigo. En la calicata No. 1 se establecieron los puntos de monitoreo para el análisis de la calidad del agua infiltrada, recuperándose en las líneas de infiltración diseñadas según los parámetros establecidos en la metodología.

La fosa fue llenada 5 veces cada 7 días con 15 m³ de agua residual del café, aguamiel. La inclinación entre la calicata No. 1 y la fosa fue del 55%; mientras que entre la fosa No. 6 y la No. 7 era del 34%. En el inciso 5.2.1 es posible observar los perfiles estratigráficos para las diferentes calicatas. Según el análisis granulométrico AASHTO T-27, T-11 el estrato No. 1, que abarca de 0,60 a 1,20 m, presenta un alto contenido de arena (56,93%) y de finos (43,07%); mientras que el estrato No. 2, de 1,20 a 3,00 m de profundidad, presenta un alto contenido de arena (47,80%) y un similar contenido de grava (34,50%), siendo el resto (17,71%) finos.

En la calicata No. 2 se tiene 64,80% de arena, 32,83 % de finos y 2,38% de grava; mientras que en la calicata testigo predomina el porcentaje de arena y finos para la mayoría de los estratos. En la calicata No. 1 la porosidad fue del 65,66% para el primer estrato, de 57,26% para el segundo y 38,57% para el tercero; y una densidad aparente de 0,89, 1,11 y 1,60 g/cm³ respectivamente.

Esta porosidad y la estructura granular presentan un flujo rápido de agua para los primeros estratos y lento, debido a la menor porosidad y a la estructura masiva, después de 2,25 m de profundidad.

La clase textural en cada punto de monitoreo se determinó mediante el método Bouyoucos. La textura del suelo en la fosa de infiltración presenta una variación de franco y franco arenoso. A 1,5 y 3,0 m de distancia desde la fosa y en el primer metro de profundidad, el suelo se definió con la clase textural franco arcillo arenoso y a partir de 1,50 m de profundidad se definen como franco arenosos, tendiendo a ser suelos de permeables a libremente permeables.

Todos los suelos, ya sea en los puntos de monitoreo o en la calicata testigo, presentaron porcentajes de arcilla mayores al 10% y por ello estaban sujetos a cambios físicos y a una elevada lixiviación química; hecho que se evidenció en el incremento de la concentración de los parámetros, entre los puntos de monitoreo, que se comparan posteriormente.

La conductividad eléctrica del suelo en el fondo de la fosa incrementó durante la infiltración y disminuyó, en la época lluviosa, de 320,0 a 160,80 S/cm; lateralmente disminuyó durante el período de infiltración e incrementó considerablemente durante la época lluviosa de 175,40 a 736,00 S/cm.

En el primer metro de profundidad de ambas calicatas, la conductividad eléctrica incrementó considerablemente a través del tiempo; mientras que a partir de 1,50 m de profundidad, ésta se incrementa en el período de infiltración y disminuye durante la época lluviosa. La variación en la calicata testigo fue similar para los estratos arenosos No. 1, 3 y 5.

La disminución de las sales se deriva de la constante precipitación pluvial, debido a la vulnerabilidad de los suelos a la lixiviación y percolación. En la tabla No. XVIII se observa el incremento en la capacidad de intercambio catiónico derivado del traslado de las sales a estratos inferiores, éstas se acumularon a una profundidad de 1,50 m ya que, a partir de ésta inicia el horizonte cementado que impide el libre movimiento de las partículas.

Para analizar la calidad del agua se establecieron dos enfoques, el primero consistió en el análisis de la calidad del agua en la fosa de infiltración a través del tiempo y el segundo analizó la calidad del agua infiltrada. Los parámetros de interés fueron: potencial de hidrógeno, demanda bioquímica de oxígeno, sólidos totales suspendidos, nitrógeno total y fósforo total.

Como es posible observar en las figuras 5 y 6, tanto la pulpa del café como el mucílago, están conformados en su mayoría por taninos, azúcares y sustancias pécticas. Éstas se remueven del grano mediante la fermentación y el posterior lavado para asegurar su adecuado desprendimiento, dando lugar al agua residual fuertemente cargada que, antes de ser descargada a la fosa, ha recibido un pre tratamiento de adición de cal que favorece la precipitación de éstas sustancias durante la residencia hidráulica en las fosas.

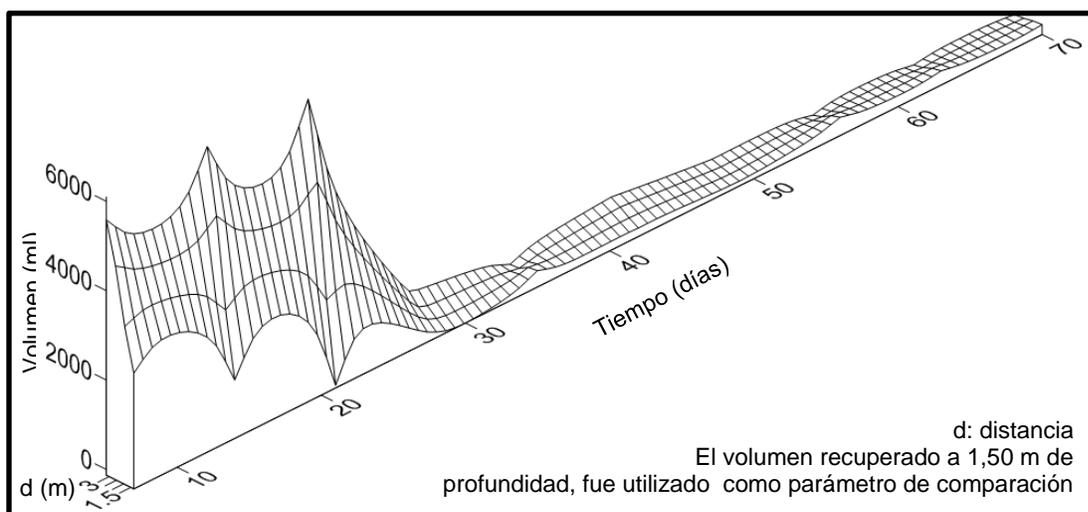
La figura No. 16 presenta las variaciones del nivel del agua en la fosa de infiltración y la precipitación pluvial (metros) en función del tiempo (días). Las primeras dos semanas presentan una reducción porcentual del 68% y 66% respectivamente; en la tercera semana se observa una disminución del 10% ya que el nivel se tornó constante debido a la impermeabilización del suelo por la sedimentación de los sólidos y la materia orgánica contenidos en el agua residual del café.

Esta capa impidió el flujo del agua hacia el subsuelo y generalmente su acumulación desemboca en rebalses ocasionados por la esorrentía superficial y la precipitación pluvial.

Según Yáñez Cosío la rápida acumulación de sólidos, en lagunas anaerobias, produce degeneración de la calidad del agua, requiriendo una limpieza de lodos, por lo que se procedió a realizar su remoción para determinar el efecto depurador del suelo; alcanzando disminuciones del 55% y del 43% en la cuarta y quinta semana respectivamente.

El nivel del agua fue disminuyendo a través del tiempo, pero se observaron incrementos en los días 59 y 73 con 0,0327 m y 0,0189 m de precipitación pluvial, respectivamente. El volumen de agua recuperado en las líneas de infiltración sigue la misma tendencia que la fosa de infiltración y se presenta en la figura 44.

Figura 44. **Volumen de agua recuperado en los puntos de monitoreo**



Fuente: elaboración propia.

De las figuras No. 17 a la 21 se observa la variación del pH, demanda bioquímica de oxígeno, sólidos totales suspendidos, nitrógeno y fósforo total en la fosa de infiltración. Así como los límites máximos permisibles del artículo 13, Acuerdo Gubernativo 12-2011. Las primeras cinco semanas representan el agua descargada a la fosa de infiltración, la cual corresponde al efluente de la planta de tratamiento de agua residual del beneficio húmedo. El período de infiltración-percolación, sin recarga puntual, inicia a partir de la quinta semana, día 37.

Se observa un incremento gradual del pH, figura 7, favorecido por el efecto de dilución de las lluvias. Sus incrementos más representativos coinciden con las máximas precipitaciones pluviales (días 59 y 73), permitiéndole así alcanzar el rango permisible establecido por el AG 12-2011.

En este período la demanda bioquímica de oxígeno y los sólidos totales suspendidos comienzan a disminuir, el primer parámetro presenta un punto de inflexión una semana después de la máxima precipitación pluvial y alcanza una disminución del 81% coincidiendo con el efecto de dilución de la segunda precipitación pluvial.

Con la máxima precipitación pluvial se observa un incremento notable de la concentración de sólidos suspendidos, debido al arrastre de sedimentos del área circundante. Sin embargo alcanza una disminución significativa del 50% en las dos últimas semanas. A pesar de la disminución de estos parámetros, la concentración final es 1 100 veces mayor al límite máximo permisible.

La concentración de nitrógeno total disminuye y la del fósforo total aumenta con la precipitación pluvial. La concentración de nitrógeno total mínima alcanzada es de $0,063 \text{ kg/m}^3$ siendo el LMP igual a $0,025 \text{ kg/m}^3$.

A diferencia del nitrógeno total la concentración de fósforo total siempre es menor al LMP, siendo éste igual a $0,015 \text{ kg/m}^3$ y la concentración máxima en la fosa es de $0,00865 \text{ kg/m}^3$.

Para el segundo enfoque, además del análisis de los parámetros mencionados previamente, se consideraron la concentración de amonio, de nitritos y de nitratos; comparándolos con las variaciones en la composición química del suelo.

Para determinar la variación significativa entre los puntos de monitoreo se aplicó el análisis de varianza para un diseño completamente aleatorizado, con 5 repeticiones a través del tiempo (semanas) y estableciendo como variables dependientes los parámetros antes mencionados.

El potencial de hidrógeno del agua infiltrada, incrementó entre los diferentes puntos de observación, siendo su valor directamente proporcional a la profundidad, después de la 3^{ra} descarga se obtuvo un mayor incremento a 1,50 m de profundidad. A pesar de este aumento los valores se encuentran fuera del rango permisible por el AG 12-2011. Sin embargo, a 3,00 m de distancia, se alcanzan valores dentro de este rango en la quinta semana. Para comprender mejor la variación del potencial de hidrógeno (pH) en función de la distancia (d) se determinó la siguiente ecuación a partir de los valores mínimos promedio de pH alcanzados en cada distancia, denotando una alta correlación en los datos:

$$\text{pH} = -0.0089d^2 - 0.22 d + 1.6 \quad R^2=1 \quad (\text{ecuación No. 12})$$

El análisis de varianza, tabla XXVII, indica que la variación del potencial de hidrógeno entre las diferentes profundidades y distancias, así como la interacción entre éstos, es significativa, con un coeficiente de correlación, R^2 , de 0.69. Se aplicó la prueba de Tuckey para la comparación de las medias de la distancia y de la profundidad, tablas No. XXVIII y XXIX, las cuales indican que las medias de los grupos son significativamente diferentes entre sí.

De la tabla XVIII a la XXI se observa que el potencial de hidrógeno en el suelo incrementa a mayor profundidad. A ambas distancias, la infiltración de las aguas mieles incrementó el pH del suelo, debido a la lixiviación de bases disueltas y a la percolación intensa del agua; durante el período de secado disminuyó.

Se observa la misma tendencia para el suelo en la fosa de infiltración, el cual se ve directamente afectado por el contacto con las aguas mieles. Los valores del pH en la calicata testigo se mantuvieron constantes en función del tiempo.

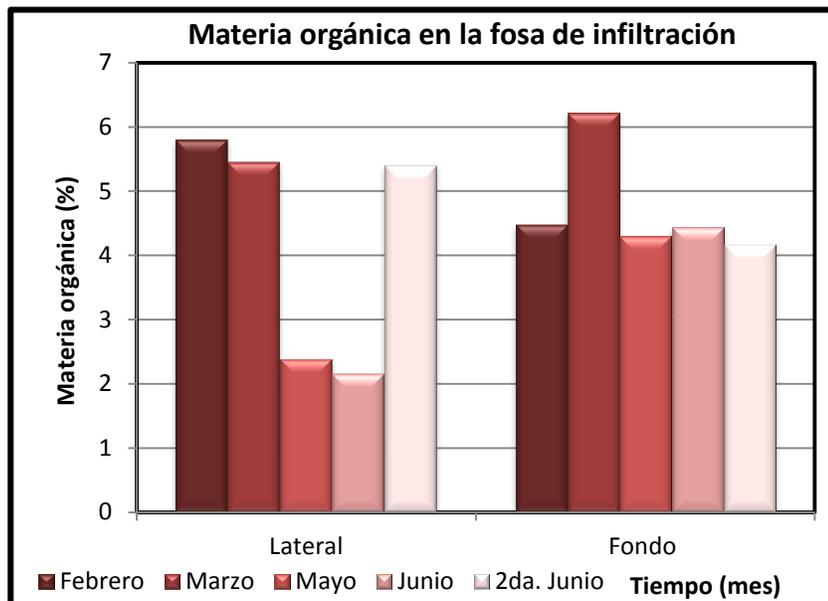
La materia orgánica en el agua fue medida indirectamente mediante la demanda bioquímica de oxígeno en 5 días (DBO_5). Se observaron incrementos en la DBO_5 entre la concentración en la fosa con las diferentes profundidades y distancias; presentando su mayor incremento a 1,00m de profundidad (1,50 m de distancia) y a 1,50 m de profundidad (3,0 m de distancia). El límite máximo permisible es de $0,075 \text{ kg/m}^3$, el valor mínimo alcanzado durante la infiltración es de $7,358 \text{ kg/m}^3$ a 1,50 m de profundidad y 1,50 m de distancia. El polinomio de segundo grado obtenido a partir de la DBO_5 promedio para cada distancia corresponde a:

$$DBO = -0.0296d^2 + 0.541d + 7.05 \quad R^2=1 \quad (\text{ecuación No. 13})$$

Según el ANDEVA, tabla No. XXX, los valores para éste parámetro presentan una variación significativa a diferentes profundidades, al aplicar la prueba de Tuckey se observa que las medias nos son significativamente diferentes, por tanto la variación de la DBO no es significativamente diferente en función de la distancia y la profundidad.

Como se observa en la siguiente figura 45, el porcentaje de materia orgánica en el suelo de la fosa disminuyó a través del tiempo, lateralmente la disminución de este parámetro fue mayor que en el fondo, debido a la deposición de los sólidos y sedimentos arrastrados por la infiltración, por la precipitación pluvial y por la escorrentía superficial. En el apéndice 9 se observa una imagen de los sedimentos depositados en el fondo de la fosa.

Figura 45. **Variación del porcentaje de materia orgánica en el suelo, en la fosa de infiltración No. 7**



Fuente: elaboración propia.

El porcentaje de materia orgánica en el fondo incrementa en el mes de marzo, el cual corresponde al muestreo realizado después de la remoción de sólidos que impermeabilizaron la fosa, los cuales son abundantes en el contenido de compuestos orgánicos.

La materia orgánica a 1,50 m de distancia y 1,00 m de profundidad, figura 23, presentó un incremento considerable al finalizar la infiltración, pero regresó a sus valores iniciales después del secado. A 3,00 m distancia el incremento es notable, durante el período de secado, a 0,60 y 1,50 m de profundidad.

La calicata testigo presenta incrementos en el porcentaje de materia orgánica durante el mes de mayo y una disminución considerable durante la segunda semana de junio. El análisis de varianza, tabla XXXII, indica que la variación es significativa a diferentes profundidades no así entre las distancias; sin embargo el modelo indica que la variación del porcentaje de materia orgánica a diferentes distancias y profundidades es significativa, debido a que la interacción entre éstas lo es. Se realizó la prueba de Tuckey para el porcentaje de materia orgánica a diferentes profundidades, indicando que ésta no es significativa.

La concentración de sólidos suspendidos incrementa a 1,00 m y 2,25 m de profundidad en la primera descarga. Sin embargo la concentración disminuye gradualmente entre los diferentes puntos de observación. Para la tercera y cuarta descargas la concentración disminuye en función de la profundidad y presenta una menor disminución a 3,00 m de distancia. En la quinta descarga la disminución de la concentración es más evidente. Según el modelo obtenido en el ANDEVA, tabla XXXIII, la variación de la concentración a diferentes profundidades y distancias es significativa.

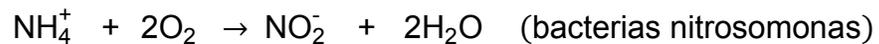
Al analizar la variación de la concentración de los sólidos totales suspendidos en el agua infiltrada y mediante la relación de las concentraciones alcanzadas a 1,50 m de profundidad, a 1,50 y 3,0 m de distancia se obtuvo el siguiente modelo matemático:

$$\text{STS} = 0.0292 d^2 - 0.0679 d + 3.49 \quad R^2=1 \quad (\text{ecuación No. 14})$$

El nitrógeno total en el agua disminuye considerablemente a 1,50 m de profundidad, en ambas distancias, representando esta tendencia a través del siguiente modelo matemático:

$$\text{NT} = -0.1454d^2 + 0.6961d + 0.1041 \quad R^2=1 \quad (\text{ecuación No. 15})$$

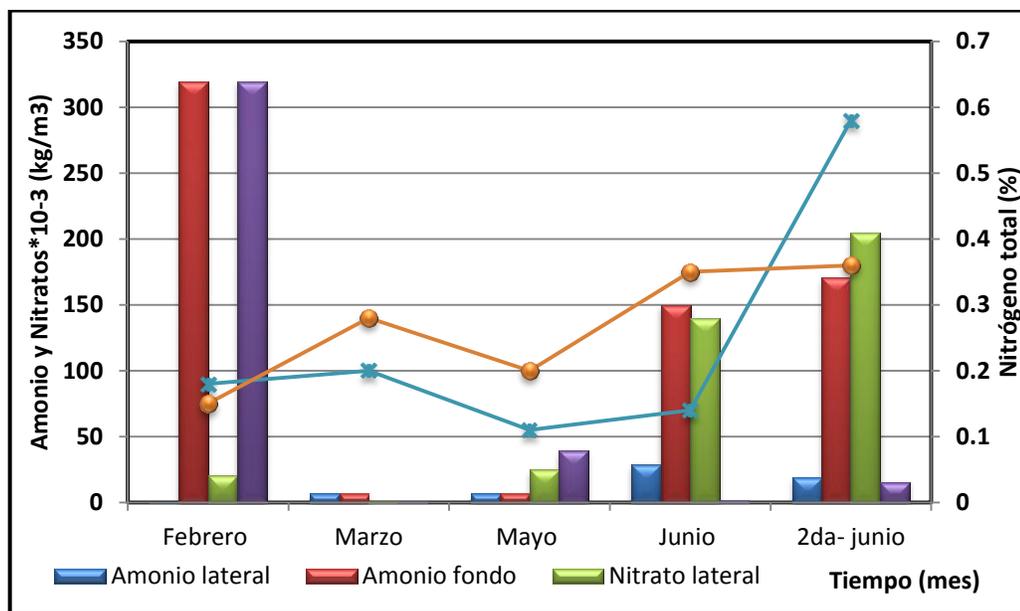
Se observa que la variación de este parámetro corresponde a un polinomio de grado 2, incrementando a mayor distancia. El proceso de nitrificación, es decir la oxidación de nitrógeno de amonio a nitrógeno de nitratos, es ineficiente debido a la percolación profunda del agua residual, siendo a partir de la tercera semana la especie predominante el nitrógeno de amonios. A 3,0 m de distancia se observa el efecto de las bacterias nitrosomonas, las cuales oxidan al ion amonio en la primera, segunda y cuarta semana, según la siguiente reacción:



El ANDEVA (tablas de la XXXIV a la XXXVII) indica que no existe variación significativa en la concentración a diferentes profundidades y distancias, de ninguna de las especies del nitrógeno (nitrógeno total, amonios, nitritos y nitratos).

El perfil estratigráfico y las figuras del apéndice 9 indican que los suelos en el emplazamiento presentan rocas fracturadas, arenas gruesas y gravas a poca profundidad, además de un bajo contenido de arcillas que inciden en una retención del agua que no es lo suficientemente adecuada para que el suelo ejerza su efecto depurador, en estas circunstancias la percolación es profunda y la remoción de nitrógeno mediante la absorción de amonio en la fase de inundación fue inadecuada, debido a que la velocidad del agua en el suelo fue mayor a la velocidad de oxidación del amonio a nitratos.

Figura 46. **Especies del nitrógeno en la fosa de infiltración No. 7**



Fuente: elaboración propia.

En la figura anterior, 46, se observa que el suelo de la fosa de infiltración presentó valores similares de amonio y nitrato antes de la infiltración, en las primeras dos semanas estos valores disminuyeron considerablemente debido a que el suelo se encontraba en un estado de inundación.

Durante el mes de mayo el nitrato incrementa pero disminuye nuevamente debido a la intensidad en las lluvias, no así para la concentración de amonio la cual incrementó en función del tiempo. En el fondo de la fosa el porcentaje de nitrógeno total incrementa paulatinamente a través del tiempo, con una disminución al finalizar la infiltración y un incremento en el período de secado; lateralmente se observa la misma tendencia.

El suelo presentó valores del potencial de hidrógeno menores a 5.5 (de la tabla XVII a la XXI), teniendo así poca incidencia en la nitrificación debido a que la actividad de las bacterias es baja a estas condiciones e incrementa óptimamente en condiciones neutras.

A 1,50 m de distancia el porcentaje de nitrógeno disponible disminuyó con la profundidad (Fig. 32) presentando, al finalizar la infiltración, un incremento en sus valores entre 0,60 y 2,25 m de profundidad; a 0,60 m de profundidad y 3,0 m de distancia se observa la misma tendencia. Durante el período de secado este parámetro regresa a sus valores iniciales. La calicata testigo presenta un incremento, a través del tiempo, del porcentaje de nitrógeno a 0,60 m de profundidad. En el apéndice 9 se observa un incremento de la vegetación circundante con coloración amarillo verdosa, denotando así la adecuada asimilación del nitrógeno por las plantas de raíz corta.

El ANDEVA (tabla XXXVIII) indica que la variación, en la distancia, en la profundidad y entre ellas, es significativa con P menor a 0,0001 y una tendencia lineal con un coeficiente de correlación igual a 0,87. La prueba de Tuckey (tablas XXXIX y XL) indica que las medias, a diferentes profundidades y distancias, son significativamente diferentes.

En los puntos de observación a 1,50 m de distancia y en la calicata testigo el incremento en la concentración de amonio a través del tiempo es notable, no así a 3,00 m de distancia, en el cual la concentración de éste disminuye. La correlación de los valores entre todos los puntos de observación es baja siendo igual a 0,32 y con una probabilidad mayor a 0,05 para la profundidad y la distancia y para su interacción, por tanto la variación de la concentración de amonio entre los diferentes puntos de observación no es significativa.

A 1,50 m de distancia, figura 39, la variación en la concentración de nitratos disminuye notablemente durante los meses de inundación, lo cual corresponde al comportamiento normal de suelos inundados. A 3,00 m de distancia se observan disminuciones durante marzo y mayo e incrementos durante los primeros 15 días de junio, en el resto del mes la concentración disminuye a excepción de 1,50 m de profundidad. La calicata testigo presenta una variación más clara, con incrementos paulatinos de la concentración para los estratos 2 y 4. El modelo estadístico, tabla XLII, indica que la variación no es significativa al considerar la profundidad, la distancia, su interacción y el tiempo. El análisis para la profundidad presenta P menor a 0,05, sin embargo no presenta variación significativa en los valores de sus medias, según la prueba de Tuckey, tabla XLIII.

En el tratamiento de aguas residuales se adiciona hidróxido de calcio para lograr la precipitación de sólidos, en esta etapa ocurre la formación de fosfatos de calcio insolubles que pueden ser fijados en el suelo en pH mayores de 7. El pH en el suelo del emplazamiento se encuentra entre 4,5 y 6,0, en estas condiciones son altamente fijados los fosfatos de aluminio.

En el recorrido del agua infiltrada por los puntos de monitoreo es posible observar la disminución del fósforo total en el agua, a diferentes profundidades, sin embargo no es significativa, presentando un modelo estadístico con P igual a 0,2291.

El modelo matemático para determinar la variación de la concentración del fósforo total (PT) en función de la distancia (d) corresponde a la siguiente ecuación:

$$PT = 0.001d^2 - 0.0044d + 0.0045 \quad R^2=1 \quad (\text{ecuación No. 16})$$

Sin embargo el fósforo retenido por el suelo no es fijado debido a la acidez del mismo, por tanto se observa un incremento en la concentración de fósforo disponible para la planta.

La variación de la concentración de fósforo disponible es significativa, tanto a diferentes distancias como a diferentes profundidades, no así en la interacción de las mismas. Sin embargo se aprueba la hipótesis debido a que la prueba de Tuckey indica que las medias son significativamente diferentes.

CONCLUSIONES

1. La evaluación del tratamiento de aguas residuales del café, a partir de una fosa de infiltración, refleja que el proceso no es eficiente para alcanzar una variación significativa en la concentración de los nutrientes y materia orgánica en el agua infiltrada en los puntos de observación.
2. En la evaluación del proceso de depuración en la fosa estudiada en función del pH, se obtuvo una diferencia máxima de 1,18 unidades menos que el límite máximo permisible establecido por el Acuerdo Gubernativo 12-2011.
3. Para la evaluación del proceso de depuración en la fosa estudiada, en función de la demanda bioquímica de oxígeno la concentración máxima es 9 084 veces mayor que el límite máximo permisible establecido por el Acuerdo Gubernativo 12-2011.
4. La concentración máxima de los sólidos totales suspendidos en el proceso de degradación del agua residual en la fosa estudiada es 3 500 veces mayor que el límite máximo permisible del Acuerdo Gubernativo 12-2011.
5. La concentración del nitrógeno total en la evaluación del proceso de depuración en la fosa estudiada es 558 veces mayor que el límite máximo permisible del Acuerdo Gubernativo 12-2011.

6. La concentración de fósforo total en el agua de descarga y en la fosa de infiltración es, 51 y 42 veces respectivamente, menor al límite máximo permisible del AG-12-2011.
7. La variación de la concentración de los parámetros físico-químicos analizados en el agua infiltrada en función de la distancia corresponden a polinomios de segundo grado, con un coeficiente de correlación igual a 1.
8. La prueba de Tuckey indica que la variación de la demanda bioquímica de oxígeno, la concentración de nitrógeno y fósforo total, en el agua infiltrada no son significativamente diferentes en función de la distancia y la profundidad.
9. El análisis de varianza para el proceso de nitrificación del agua infiltrada, indica que las diferencias en la concentración de las especies analizadas, en agua y en suelo, no son significativas.
10. La característica estructural del suelo favorece una percolación profunda redundando en una inadecuada retención del agua que impide al suelo ejercer su efecto depurador.
11. El incremento significativo en la concentración de fósforo disponible en el suelo es producto de la baja fijación de los fosfatos de calcio presentes en el agua residual, previamente tratada con cal.
12. El análisis del perfil estratigráfico del suelo, en el área influenciada por la fosa de infiltración estudiada, indica que la zona de intercambio químico, la concentración de materia orgánica y el movimiento libre de agua está limitado por el horizonte cementado a partir de 1,5 m de profundidad.

RECOMENDACIONES

1. Previo a la instalación de una fosa de infiltración es necesario analizar la ubicación física del emplazamiento, la geología, la climatología e hidrología, así como la caracterización del suelo y del agua residual.
2. Mejorar la operación de los sistemas de tratamiento de agua residual para aportar efluentes con una mejor calidad del agua a las fosas de infiltración, de tal forma que el impacto al suelo sea lo más nulo posible.
3. Limpiar periódicamente la fosa de infiltración evitando así la restricción del flujo del agua y rebalses ocasionados por la escorrentía superficial y la precipitación pluvial durante la época lluviosa.
4. Aplicar revestimiento natural a las fosas de infiltración, ya sea con rocas de origen calcáreo que ayuden a neutralizar las aguas residuales, o toba y carbón para mejorar la remoción de color.
5. Evaluar el reuso del efluente con fines de riego, debido a que su alto contenido de nutrientes, mediante la infiltración a través del suelo, incrementa las concentraciones disponibles para la planta.
6. Implementar el uso de lagunas de estabilización de acuerdo al caudal del beneficio húmedo y a las condiciones del lugar, para asegurar la degradabilidad de la materia orgánica en función de la carga orgánica del efluente.

7. Neutralizar el agua residual descargada en la fosa e inocularla con microorganismos para favorecer la biodegradación anaerobia en un menor tiempo.

8. Evaluar el uso de la tecnología blanda infiltración-percolación modificada, mediante la regulación de la calidad del agua de alimentación, su volumen y sistema de aplicación, así como la calibración de la arena, el recubrimiento vegetal y la formación de una biopelícula que asegure la retención y depuración del agua.

BIBLIOGRAFÍA

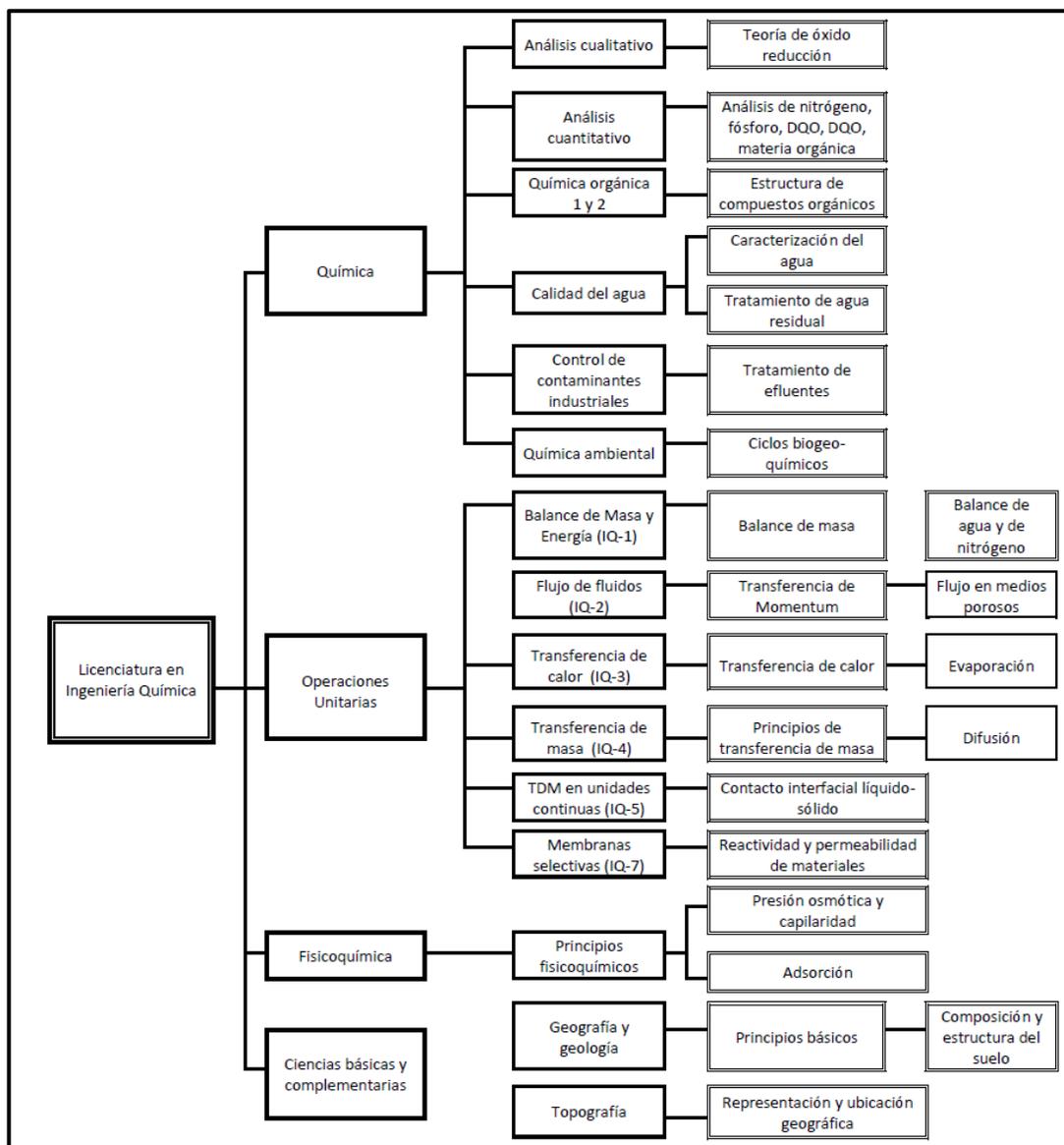
1. Guatemala. *Acuerdo Gubernativo 12-2011*. Guatemala: Diario de Centroamérica, 17 de enero del 2011, p. 14.
2. Asociación Nacional del Café. *Greenbook: Guatemalan coffees*. Guatemala: ANACAFE, 2008. 36 p.
3. BRESSANI, Ricardo. *Composición química de los subproductos del café*. En: Reunión internacional sobre la utilización de subproductos agrícolas e industriales, 11 al 14 de junio de 1974. Turrialba: IICA, 1974. 13 p.
4. CHOW, Ven Te. *Hidrología aplicada*. Saldarriaga, J. (trad.) Madrid: McGraw-Hill, 1994. 584 p. ISBN 9586001717.
5. ESPINOZA, Carlos. *Comportamiento hidráulico de un sistema de infiltración de aguas servidas tratadas en el suelo*. [en línea] Universidad de Chile, División de Recursos Hídricos y Medio Ambiente. <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/aresidua/i-147.pdf> [Consulta: 23 de enero de 2011].
6. FASSEBENDER, Hans. *Química de suelos: con énfasis en suelos de américa latina*. San José, Costa Rica: Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas, 1978. 398 p.

7. FOSTER, Stephen, et al. *Análisis de contaminación de las aguas subterráneas por sistemas de saneamiento básico*. [en línea] Lima: CEPIS, 1988. <http://www.bvsde.paho.org/eswww/fulltext/repind46/analisis/analisis.html> [Consulta: 10 de enero de 2011].
8. GLIESSMAN, Stephen. *Agroecología: procesos ecológicos en agricultura sostenible*. Turriabla, Costa Rica: CATIE, 2002. ISBN 9977573859. 106 p.
9. KIELY, Gerard. "Conceptos de hidrología". En: *Ingeniería Ambiental: fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión*. Madrid: McGraw-Hill, 1999. p. 321 – 415.
10. *La depuración de aguas residuales urbanas de pequeñas poblaciones mediante infiltración directa en el terreno: fundamentos y casos prácticos*. [en línea] Moreno, Luis. (ed.) España: IGME, 2002. 167 p. ISBN 8478404643. Número 4 de Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España: Serie Hidrogeología y aguas subterráneas. [Consulta: 20 de enero de 2011].
11. PURANDARA, B, et al. *Transporte simultáneo de agua y solutos en suelo no saturado*. [en línea] Bélgica: Instituto Nacional de Hidrología, 1991. <http://www.ias.ac.in/jess/aug2008/jess90.pdf> [Consulta: 20 de enero de 2011].
12. RAMÍREZ, Lilian. *Estudio sobre la calidad del agua subterránea del área noroeste del Valle de la Ciudad de Guatemala*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2003. 150 p.

13. REGALADO, Carlos, et al. Diseño experimental para la extracción de solución del suelo en régimen de in-saturación. [en línea] Samper, Javier; Paz, Antonio (ed.) *VII Jornadas de Investigación en la Zona no Saturada del Suelo*. España: 2005. http://www.zonanosaturada.com/publics/ZNS05/zns05_web.pdf [Consulta: 14 de enero de 2011].
14. REYES, Memphis. *Aplicación del diseño experimental en el desarrollo de las prácticas internas, en el área de operaciones unitarias*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2009. 165 p.
15. *Seminario regional de consulta sobre situación actual del beneficiado de café, revisión y avances tecnológicos del proceso*: diciembre de 1998. IICA (publicador) Heredia, Costa Rica: CICAFFE, 1998. 14 p.
16. TISDALE, Samuel, et al. *Fertilidad de suelos y fertilizantes*. 5a ed. New York: MacMillan, 1977. 760 p.
17. VALLEJOS, Julio, et al. *Bases de diseño para un sistema de tratamiento suelo – acuífero. Aplicación caso Copiapó*. [en línea] Santiago, Chile: Universidad de Chile, División de Recursos Hídricos y Medio Ambiente, 2001. <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/chile14/vallejo.pdf> [Consulta: 20 de diciembre de 2011].
18. YÁNEZ, Fabían. *Lagunas de estabilización: teoría, diseño, evaluación y mantenimiento*. Ecuador: Monsalve, 1993. 421 p.

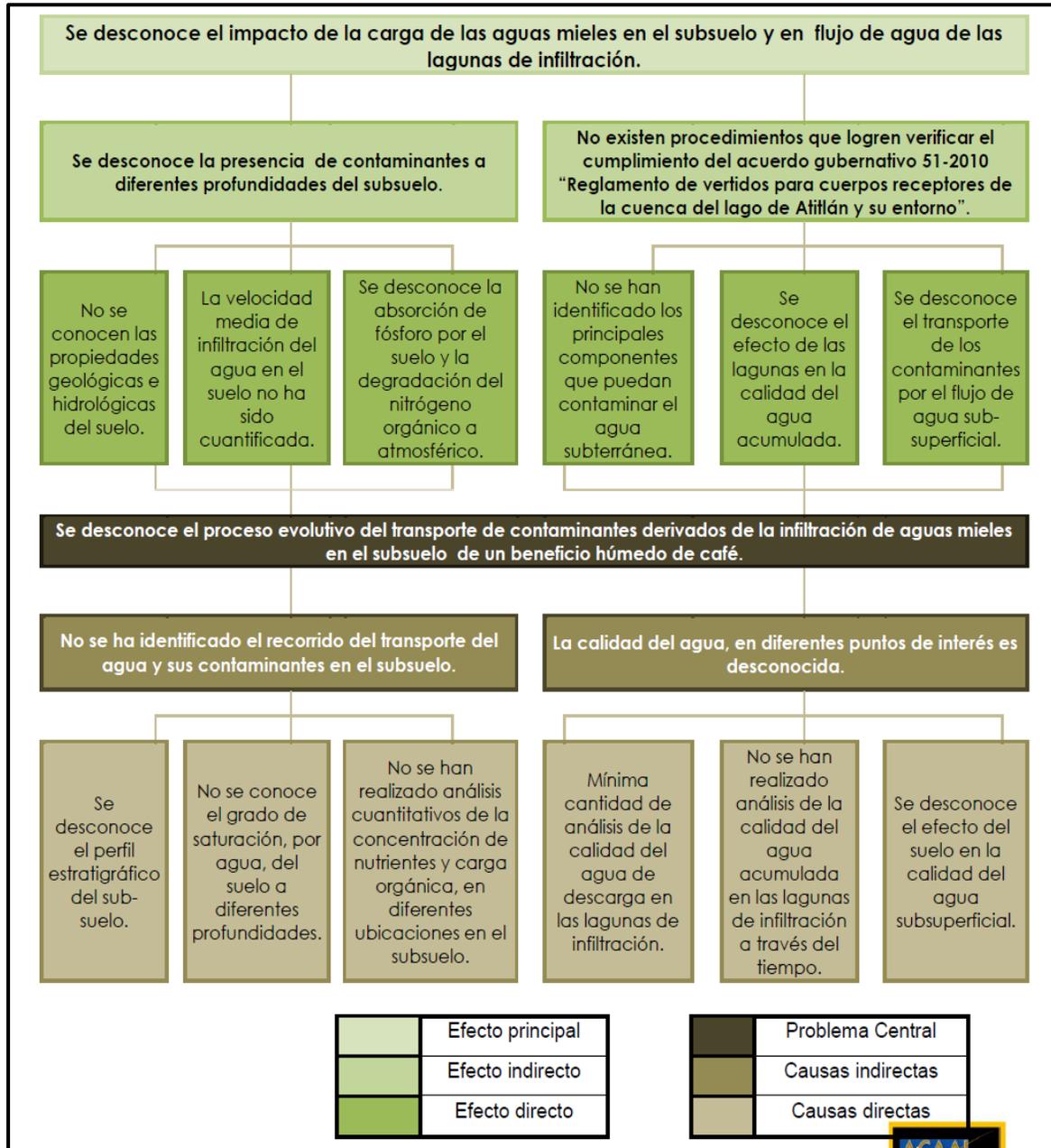
APÉNDICES

Apéndice 1. **Tabla de requisitos académicos**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Árbol de problemas



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. **Caudal másico de la descarga del agua residual
hacia la fosa de infiltración**

Tiempo (s)	Peso muestra (lb)	Peso cubeta (lb)	Peso agua residual (lb)	Peso (kg)	Caudal másico (kg/s)
10	13,15	0,5	12,65	5,74	0,574
10	13,9	0,5	13,4	6,08	0,608
10	14,5	0,5	14	6,35	0,635
Promedio (kg/s)					0,606
10	14,3	0,5	13,8	6,26	0,626
10	14,7	0,5	14,2	6,44	0,644
10	14,4	0,5	13,9	6,31	0,631
Promedio (kg/s)					0,634
10	14,5	0,5	14	6,35	0,635
10	14,1	0,5	13,6	6,17	0,617
10	13,8	0,5	13,3	6,03	0,603
Promedio (kg/s)					0,619
10	14,7	0,5	14,2	6,44	0,644
10	14,6	0,5	14,1	6,40	0,640
10	14,5	0,5	14	6,35	0,635
Promedio (kg/s)					0,640
10	14,3	0,5	13,8	6,26	0,626
10	14,1	0,5	13,6	6,17	0,617
10	13,9	0,5	13,4	6,08	0,608
Promedio (kg/s)					0,617

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. **Altura del nivel del agua en la fosa de infiltración y en las calicatas No. 1 y No. 2.**

Fecha	Hora	Laguna (plg)	Laguna (m)	C-1 (plg)	C-1 (m)	C-2 (plg)	C-2 (m)
28/02/2011	12:18	44,500	0,216	0,000	0,000	7,000	0,178
28/02/2011	15:24	26,000	0,686	0,000	0,000	7,000	0,178
01/03/2011	9:45	32,500	0,521	9,840	0,250	27,500	0,699
02/03/2011	8:11	40,000	0,330	0,000	0,000	18,500	0,470
03/03/2011	8:46	41,300	0,297	0,000	0,000	11,500	0,292
04/03/2011	9:00	42,800	0,259	0,000	0,000	7,000	0,178
05/03/2011	8:23	44,300	0,221	0,000	0,000	4,100	0,104
06/03/2011	8:14	45,800	0,183	0,000	0,000	2,000	0,051
07/03/2011	12:30	46,900	0,155	0,000	0,000	0,000	0,000
07/03/2011	15:30	30,500	0,572	0,000	0,000	0,000	0,000
07/03/2011	20:00	33,000	0,508	0,000	0,000	0,000	0,000
08/03/2011	8:00	35,000	0,457	6,700	0,170	7,880	0,200
08/03/2011	16:00	36,000	0,432	11,000	0,279	10,830	0,275
09/03/2011	8:00	37,500	0,394	14,500	0,368	14,500	0,368
09/03/2011	16:00	39,000	0,356	7,000	0,178	7,800	0,198
10/03/2011	8:00	40,500	0,318	0,000	0,000	6,500	0,165
11/03/2011	7:00	43,000	0,254	0,000	0,000	5,000	0,127
11/03/2011	17:10	44,000	0,229	0,000	0,000	3,300	0,084
12/03/2011	7:45	44,300	0,221	0,000	0,000	3,000	0,076
12/03/2011	17:08	44,700	0,211	0,000	0,000	2,200	0,056
13/03/2011	8:15	45,300	0,196	0,000	0,000	1,300	0,033
14/03/2011	9:00	47,000	0,152	0,000	0,000	0,000	0,000
15/03/2011	8:33	47,500	0,140	0,000	0,000	0,000	0,000

Continuación del apéndice 4.

Fecha	Hora	Laguna (plg)	Laguna (m)	C-1 (plg)	C-1 (m)	C-2 (plg)	C-2 (m)
16/03/2011	13:20	48,000	0,127	0,000	0,000	0,000	0,000
16/03/2011	16:10	35,500	0,445	0,000	0,000	0,000	0,000
17/03/2011	8:15	36,300	0,424	0,000	0,000	1,000	0,025
18/03/2011	8:35	37,600	0,391	0,000	0,000	1,000	0,025
19/03/2011	8:18	38,500	0,368	0,000	0,000	0,500	0,013
20/03/2011	8:07	39,800	0,335	0,000	0,000	0,000	0,000
21/03/2011	8:11	41,000	0,305	0,000	0,000	0,000	0,000
22/03/2011	8:24	41,000	0,305	0,000	0,000	0,000	0,000
23/03/2011	9:30	41,000	0,305	0,000	0,000	0,000	0,000
24/03/2011	8:45	41,000	0,305	0,000	0,000	0,000	0,000
25/03/2011	8:10	0,000	1,346	0,000	0,000	0,000	0,000
26/03/2011	8:15	0,000	1,346	0,000	0,000	0,000	0,000
27/03/2011	8:35	0,000	1,346	0,000	0,000	0,000	0,000
28/03/2011	8:18	33,000	0,508	0,000	0,000	0,000	0,000
29/03/2011	8:45	37,500	0,394	10,236	0,260	10,630	0,270
30/03/2011	9:05	39,500	0,343	4,724	0,120	9,843	0,250
31/03/2011	8:50	40,000	0,330	0,000	0,000	8,268	0,210

Continuación del apéndice 4.

Fecha	Hora	Laguna (plg)	Laguna (m)	C-1 (plg)	C-1 (m)	C-2 (plg)	C-2 (m)
01/04/2011	8:15	41,000	0,305	0,000	0,000	7,800	0,198
02/04/2011	8:35	42,000	0,279	0,000	0,000	7,480	0,190
03/04/2011	7:30	43,000	0,254	0,000	0,000	6,299	0,160
04/04/2011	7:55	43,500	0,241	0,000	0,000	5,118	0,130
05/04/2011	7:25	44,000	0,229	0,000	0,000	3,937	0,100
05/04/2011	16:10	33,000	0,508	0,000	0,000	2,756	0,070
06/04/2011	10:50	37,000	0,406	0,000	0,000	1,969	0,050
07/04/2011	9:15	38,000	0,381	0,000	0,000	0,000	0,000
08/04/2011	8:20	39,000	0,356	0,000	0,000	0,000	0,000
09/04/2011	8:40	39,500	0,343	0,000	0,000	0,000	0,000
10/04/2011	7:05	40,000	0,330	0,000	0,000	0,000	0,000
11/04/2011	8:30	41,000	0,305	0,000	0,000	0,000	0,000
12/04/2011	8:45	41,500	0,292	0,000	0,000	0,000	0,000
13/04/2011	10:30	42,000	0,279	0,000	0,000	0,000	0,000
14/04/2011	9:10	43,000	0,254	0,000	0,000	0,000	0,000
15/04/2011	7:30	43,500	0,241	0,000	0,000	0,000	0,000

Continuación del apéndice 4.

Fecha	Hora	Laguna (plg)	Laguna (m)	C-1 (plg)	C-1 (m)	C-2 (plg)	C-2 (m)
16/04/2011	8:46	44,000	0,229	0,000	0,000	0,000	0,000
17/04/2011	9:00	44,500	0,216	0,000	0,000	0,000	0,000
18/04/2011	8:23	45,000	0,203	0,000	0,000	0,000	0,000
19/04/2011	9:15	46,000	0,178	0,000	0,000	0,000	0,000
20/04/2011	8:20	46,500	0,165	0,000	0,000	0,000	0,000
21/04/2011	8:40	46,800	0,157	0,000	0,000	0,000	0,000
22/04/2011	7:05	47,000	0,152	0,000	0,000	0,000	0,000
23/04/2011	8:00	46,500	0,165	0,000	0,000	0,000	0,000
24/04/2011	9:10	45,700	0,185	0,000	0,000	0,000	0,000
25/04/2011	7:30	47,000	0,152	0,000	0,000	0,000	0,000
26/04/2011	8:46	47,300	0,145	0,000	0,000	0,000	0,000
27/04/2011	9:00	44,700	0,211	0,000	0,000	0,000	0,000
28/04/2011	8:23	44,500	0,216	0,000	0,000	0,000	0,000
29/04/2011	9:15	45,000	0,203	0,000	0,000	0,000	0,000
30/04/2011	8:20	46,000	0,178	0,000	0,000	0,000	0,000

Continuación del apéndice 4.

Fecha	Hora	Laguna (plg)	Laguna (m)	C-1 (plg)	C-1 (m)	C-2 (plg)	C-2 (m)
01/05/2011	8:40	46,400	0,168	0,000	0,000	0,000	0,000
02/05/2011	9:10	46,700	0,160	0,000	0,000	0,000	0,000
03/05/2011	7:30	46,800	0,157	0,000	0,000	0,000	0,000
04/05/2011	8:35	47,000	0,152	0,000	0,000	0,000	0,000
05/05/2011	8:18	47,700	0,135	0,000	0,000	0,000	0,000
06/05/2011	8:07	48,080	0,125	0,000	0,000	0,000	0,000
07/05/2011	8:11	49,020	0,101	0,000	0,000	0,000	0,000
08/05/2011	8:24	49,070	0,100	0,000	0,000	0,000	0,000
09/05/2011	8:40	50,000	0,076	0,000	0,000	0,000	0,000
10/05/2011	8:10	50,500	0,064	0,000	0,000	0,000	0,000
11/05/2011	9:00	48,100	0,124	0,000	0,000	0,000	0,000
12/05/2011	8:24	48,350	0,118	0,000	0,000	0,000	0,000
13/05/2011	8:45	48,890	0,104	0,000	0,000	0,000	0,000
14/05/2011	8:37	49,950	0,077	0,000	0,000	0,000	0,000
15/05/2011	8:56	50,580	0,061	0,000	0,000	0,000	0,000
16/05/2011	9:00	50,920	0,053	0,000	0,000	0,000	0,000

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. **Sólidos totales suspendidos en el agua infiltrada a diferentes profundidades y distancias a través del tiempo**

Distancia (m)	Profundidad (m)	Sólidos totales suspendidos (kg/m ³)				
		Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5
0,00	0,00	4 302,00	4 326,00	4 610,00	5 972,00	3600,00
1,50	1,00	4 880,00	4 738,00	4 184,00	2 798,00	3316,00
1,50	1,50	5 146,00	4 678,00	2 954,00	1 514,00	2978,00
1,50	2,25	4 948,00	4 520,00	2 600,00	1 466,00	2750,00
3,00	1,50	4 406,00	4 482,00	3 784,00	3 476,00	3200,00

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. **Potencial de hidrógeno en el agua infiltrada a diferentes profundidades y distancias en función del tiempo**

Distancia (m)	Profundidad (m)	Potencial de hidrógeno				
		Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5
0,00	0,00	4,4	4,88	4,87	4,42	4,82
1,50	1,00	4,75	4,92	5,07	5,18	5,32
1,50	1,50	4,98	5,18	5,19	5,9	6,9
1,50	2,25	5,13	5,24	4,77	4,83	5,15
1,50	3,00	5,1	5,40	4,97	N.D.	N.D.
3,00	1,50	5,43	5,48	6,11	6,69	7,07
3,00	2,25	5,87	6,1	5,43	6,7	5,14
3,00	3,00	5,9	6,1	N.D.	N.D.	N.D.

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 7. **Temperatura del agua infiltrada a diferentes profundidades y distancias en función del tiempo**

Distancia (m)	Profundidad (m)	Temperatura (°C)				
		Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5
0,00	0,00	17,20	18,10	19,80	16,50	20,20
1,50	1,00	17,90	19,10	19,80	18,00	18,30
1,50	1,50	18,10	19,30	19,50	17,80	19,90
1,50	2,25	21,00	20,41	20,40	21,20	26,10
1,50	3,00	18,30	19,70	19,40	N.D.	N.D.
3,00	1,50	21,30	21,10	21,70	21,40	22,10
3,00	2,25	22,00	23,20	20,10	23,00	25,80
3,00	3,00	21,90	25,10	N.D.	N.D.	N.D.

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 8. **Presupuesto**

Costos para el análisis de suelos			
Descripción	Cantidad	Costo (Q./u)	Subtotal (Q.)
Análisis complete	70	175,00	12 250,00
Textura	23	175,00	4 025,00
Porosidad	3	115,00	360,00
Análisis de nitrógeno total	70	70,00	4 900,00
Total			Q. 21 535,00

Fuente: elaboración propia, con colaboración de ANALAB.

Continuación del apéndice 8.

Costos para el análisis de agua			
Descripción	Cantidad	Costo (Q./u)	Subtotal (Q.)
Análisis completo A-12	10	360,00	3 600,00
Análisis LIQA (8 parámetros)	24	876,00	21 024,00
Total			Q. 24 624,00

Fuente: elaboración propia, con colaboración de ANALAB y LIQA.

Costos de instalación de los puntos de monitoreo			
Descripción	Cantidad	Costo (Q./u)	Subtotal (Q.)
Mano de obra (Q/m³ calicata)	12	200,00	2 400,00
Mano de obra (c/u)	7	200,00	1 400,00
Tapón de tubería	14	15,90	222,60
Tubería PVC 2.5 plg	28	15,00	420,00
Total			Q. 4 442,60

Fuente: elaboración propia.

Costos del material de muestreo			
Descripción	Cantidad	Costo (Q./u)	Subtotal (Q.)
Botellas de dos litros	50	3,00	150,00
Hielera	1	55,00	55,00
Bolsas de hielo	24	6,00	144,00
Total			Q. 349,00

Fuente: elaboración propia.

Continuación del apéndice 8.

Costos de las giras de monitoreo y recurso humano			
Descripción	Cantidad	Costo (Q./u)	Subtotal (Q.)
Transporte (km recorridos)	1 002	30,00	668,00
Costo de cada gira	12	300,00	3 600,00
Salario asesor (horas)	30	400,00	12 000,00
Salario investigador (meses)	5	1 500,00	7 500,00
Total			Q. 23 768,00

Fuente: elaboración propia.

Resumen del costo de la investigación	
Descripción	Subtotal (Q.)
Análisis de suelos	16 200,00
Análisis de agua	15 960,00
Puntos de monitoreo	4 132,90
Material de muestra	226,00
Giras	23 768,00
TOTAL	Q. 74 718,60

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 9. **Caracterización del emplazamiento**



Fuente: calicata 1, beneficio húmedo de café San Isidro Chacayá.



Fuente: calicata testigo, beneficio húmedo de café San Isidro Chacayá.

Continuación del apéndice 9.



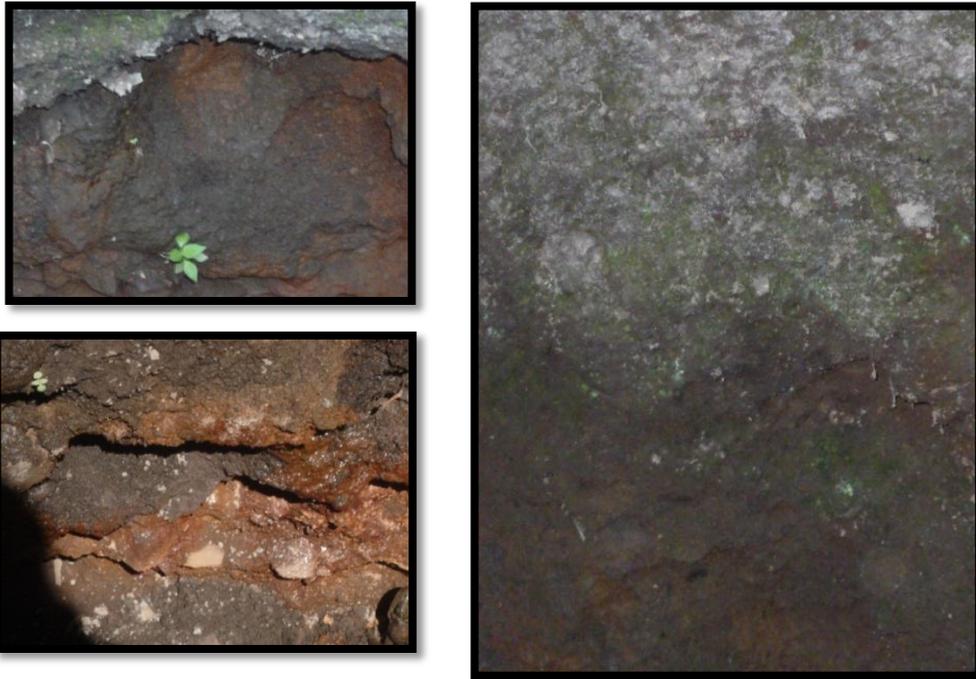
Fuente: fosa de infiltración 7; antes, durante y después de la infiltración, beneficio húmedo de café San Isidro Chacayá.

Continuación del apéndice 9.



Fuente: sólidos sedimentados en la fosa de infiltración 7, beneficio húmedo de café San Isidro Chacayá.

Continuación del apéndice 9



Fuente: variación de la composición de los estratos en la calicata 1, derivada de la infiltración de agua miel, beneficio húmedo de café San Isidro Chacayá.

Phyllophaga spp.
(gallina ciega)



Anfibio, del orden
anuros (sapo)



Larva de mosquito
culex



Fuente: indicadores encontrados en la calicata No. 1 y en el agua de la fosa de infiltración, beneficio húmedo de café San Isidro Chacayá.

ANEXOS

Anexo 1. **Calidad del agua descargada e infiltrada en la fosa de infiltración a través del tiempo**

PERÍODO	Tiempo		PARÁMETRO				
	Días	Fecha	pH	DBO	STS	Nt _{Kjendahl}	Pt
DESCARGA	0	28-feb	4,40	7 352,00	3 350,00	115,50	6,07
	7	07-mar	4,88	7 216,00	3 400,00	84,00	1,78
	14	14-mar	4,87	7 731,00	4 000,00	87,50	2,85
	21	28-mar	4,42	5 885,00	3 200,00	129,50	7,39
INFILTRACIÓN	28	04-abr	4,82	6 888,00	3 600,00	80,50	4,25
	35	11-abr	4,87	3 240,00	3 600,00	105,00	2,72
	42	25-abr	5,13	3 234,00	2 000,00	164,50	3,19
	49	02-may	5,46	600,00	2 400,00	129,50	5,49
	56	09-may	6,77	800,00	2 000,00	63,00	2,89
	63	16-may	7,21	150,00	1 200,00	70,00	8,65

Fuente: LIQA. Informe de análisis fisicoquímico 1103007. p. 3-10.

Anexo 2. Demanda bioquímica de oxígeno del agua infiltrada a diferentes profundidades y distancias en función del tiempo

Distancia (m)	Profundidad (m)	Demanda bioquímica de oxígeno (mg/L)				
		Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5
0,00	0,00	7 352,00	7 216,00	7 731,00	5 885,00	6 888,00
1,50	1,00	7 901,00	7 830,00	8 827,00	8 065,00	8 026,00
1,50	1,50	7 707,00	7 358,00	8 219,00	7 713,00	7 977,00
1,50	2,25	7 791,00	7 819,00	8 550,00	ND	ND
3,00	1,50	8 890,00	7 990,00	8 338,00	7 799,00	9 014,00

Fuente: LIQA. Informe de análisis fisicoquímico 1103007. p. 10.

Anexo 3. Fósforo total en el agua infiltrada a diferentes profundidades y distancias en función del tiempo

Distancia (m)	Profundidad (m)	Fósforo total (mg/L)				
		Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5
0,00	0,00	3,492	0,3704	0,886	0,9604	1,6736
1,50	1,00	1,004	0,71	1,003	1,545	1,4836
1,50	1,50	0,559	0,2308	0,2385	0,1604	0,3690
1,50	2,25	0,4512	0,2664	N.D.	N.D.	N.D.
3,00	1,50	0,65	0,59	1,839	0,665	0,383

Fuente: LIQA. Informe de análisis fisicoquímico 1103007. p. 8.

Anexo 4. **Nitrógeno total en el agua infiltrada a diferentes profundidades y distancias en función del tiempo**

Distancia (m)	Profundidad (m)	Nitrógeno total (kg/m ³)				
		Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5
0,00	0,00	0,3844	0,4069	0,5078	0,45260	0,9330
1,50	1,00	0,3744	0,2138	0,3700	0,35086	0,7490
1,50	1,50	0,3470	0,2986	0,2250	0,28320	0,4030
1,50	2,25	0,1631	0,2363	ND	ND	ND
3,00	1,50	0,5002	0,2028	0,2470	0,29410	0,5280

Fuente: elaboración propia con colaboración de LIQA. Informe de análisis fisicoquímico 1103007. p. 6.

Anexo 5. **Concentración de las especies del nitrógeno en el agua infiltrada**

Tiempo	Profundidad-Distancia (m)	Nitrógeno total (kg/m ³)	Amonio (kg/m ³)	Nitratos (kg/m ³)	Nitritos (kg/m ³)
Semana 1	Fosa	0,3844	0,03020	0,2797	0,0466
	1,00 – 1,50	0,3744	0,017310	0,5360	0,4750
	1,50 – 1,50	0,3470	0,045790	0,6058	0,4900
	2,25 - 1,50	0,1631	0,033440	0,0777	0,1038
	1,50 - 3,00	0,5002	0,019490	1,2012	0,5050
Semana 2	Fosa	0,4069	< 0,000001	0,2580	0,0900
	1,00 – 1,50	0,2138	0,006700	0,1221	0,0850
	1,50 – 1,50	0,2986	0,015710	0,1581	0,2375
	2,25 - 1,50	0,2363	< 0,000001	0,1277	0,3275
	1,50 - 3,00	0,2028	0,023850	0,1110	0,3175
Semana 3	Fosa	0,5078	0,000001	0,4480	0,3200
	1,00 – 1,50	0,3700	0,000001	0,1222	0,1030
	1,50 – 1,50	0,2250	0,001520	0,1110	0,1775
	2,25 - 1,50	0,2250	ND	ND	ND
	1,50 - 3,00	0,2470	0,023900	0,2101	0,0650
Semana 4	Fosa	0,4526	0,008090	0,3013	0,0986
	1,00 – 1,50	0,3509	0,006270	0,0822	0,0613
	1,50 – 1,50	0,2832	0,010830	0,0546	0,0601
	1,50 - 3,00	0,2941	0,044660	0,1816	0,2650
Semana 5	Fosa	0,9330	0,000001	0,9330	0,2415
	1,00 – 1,50	0,7490	0,015830	0,7490	0,1645
	1,50 – 1,50	0,4030	0,021510	0,4030	0,2570
	1,50 - 3,00	0,5280	0,000001	0,5280	0,1205

Fuente: LIQA. Informe de análisis fisicoquímico 1103007. p. 3 – 6.

Anexo 6. **Concentración de las especies del nitrógeno en el suelo**

Distancia (m)	1,50 m	3,00 m	1,50 m	3,00 m	1,50 m	3,00 m
Profundidad (m)	Nitrógeno total (p/v)		Amonio *10 ⁻³ (kg/m ³)		Nitratos *10 ⁻³ (kg/m ³)	
0,6	0,26	0,27	0,43	34,5	52	93,1
	0,18	0,18	5,76	22,66	27,81	78,86
	0,28	0,26	3	5	21	62
	0,14	0,28	8,59	8,05	90,7	81,56
	0,24	0,3	32,17	19,99	45,54	11,6
1	0,18	0,15	5	26	20,63	87,4
	0,1	0,13	56,33	24	1,79	42
	0,25	0,15	6,21	5,76	16,1	71,36
	0,08	0,15	8,41	9,63	59,66	136,84
	0,09	0,15	36	16,95	120,93	13,53
1,5	0,06	0,14	44,29	57,09	144,9	38,17
	0,03	0,14	49,17	289,86	0,1	0,83
	0,08	0,14	28,31	140,56	59,31	21,87
	0,05	0,18	5,46	1,86	41,13	109,33
	0,05	0,1	46,4	16,64	32,56	181,33
2,25	0,01	0,05	18,21	64,19	18,21	74,23
	0,01	0,01	7,52	18,44	0,14	0,61
	0,04	0	2,86	3,51	14,53	15,8
	0	0,1	2,79	73,92	7,17	60,6
	0	0	16,62	12	10,96	13,01
3	0,01	0,01	8,37	43,28	8,37	4,67
	0,01	0,01	39,29	23,83	0,1	0,89
	0	0	2,39	7,44	8,81	12,24
	0	0	5,39	142	2,07	8,82
	0	0,01	18,16	14,27	36,17	45,9

Fuente: Laboratorio de suelos, plantas y aguas de ANACAFE. No. de Orden 18-1123, 18-1124, 18-1179, 18-2739, 18-2940, 18-3147.

Anexo 7. Precipitación promedio, expresada en milímetros por día

AÑO	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
2009	0,0	0,0	0,0	85,1	324,9	279,7
2010	3,3	133,9	77,0	128,9	452,0	461,6
2011	0,0	6,2	8,7	46,2	87,7	353,5

Fuente: INSIVUMEH, sección de Climatología. Estación meteorológica Santiago Atitlán, departamento Sololá.

Anexo 8. Temperatura media, máxima y mínima promedio, expresada en grados Celsius, de enero a junio

Descripción	AÑO	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
$T_{\text{máxima}}$	2009	24,8	25,4	25,9	26,5	24,5	24,6
T_{promedio}		17,8	18,2	18,3	19,2	19,2	19,3
$T_{\text{mínima}}$		10,4	10,5	9,7	12,4	14,0	14,5
$T_{\text{máxima}}$	2010	25,3	25,6	26,0	26,0	25,4	24,5
T_{promedio}		18,1	18,9	19,0	20,0	20,3	19,8
$T_{\text{mínima}}$		10,5	12,1	11,2	13,5	15,0	14,9
$T_{\text{máxima}}$	2011	25,1	25,4	25,5	25,7	25,7	28,4
T_{promedio}		17,6	18,2	18,5	19,2	20,0	19,5
$T_{\text{mínima}}$		9,5	9,6	10,2	12,1	14,1	14,4

Fuente: INSIVUMEH, sección de Climatología. Estación meteorológica del municipio de Santiago Atitlán, departamento Sololá.

Anexo 9. Humedad media, máxima y mínima promedio, expresada en porcentaje de humedad relativa, de enero a junio

Descripción	AÑO	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
HR _{máxima}	2009	93	87	83	89	95	90
HR _{promedio}		70	64	67	75	84	85
HR _{mínima}		45	41	43	50	63	66
HR _{máxima}	2010	91	96	96	95	95	95
HR _{promedio}		71	81	82	81	84	85
HR _{mínima}		43	50	54	56	64	62
HR _{máxima}	2011	92	92	87	95	93	94
HR _{promedio}		73	71	67	78	81	86
HR _{mínima}		41	44	37	47	55	59

Fuente: INSIVUMEH, sección de Climatología. Estación meteorológica del municipio de Santiago Atitlán, departamento Sololá.

Anexo 10. Evapotranspiración en tanque, expresada en milímetros

AÑO	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
2009	4,5	5,7	5,7	4,8	3,0	3,5
2010	4,7	3	4,4	4,1	3,4	2,7

Fuente: INSIVUMEH, sección de Climatología. Estación meteorológica del municipio de Santiago Atitlán, departamento Sololá.

Anexo 11. **Artículo 13, Acuerdo Gubernativo No. 12-2011: Reglamento de descargas de aguas residuales en la cuenca del lago de Atitlán.**

Artículo 13. Límites Máximos Permisibles para las Descargas al Subsuelo. Los entes generadores que descarguen aguas residuales al subsuelo en la cuenca del lago de Atitlán, deben cumplir con los límites máximos permisibles de los parámetros que se indican a continuación:

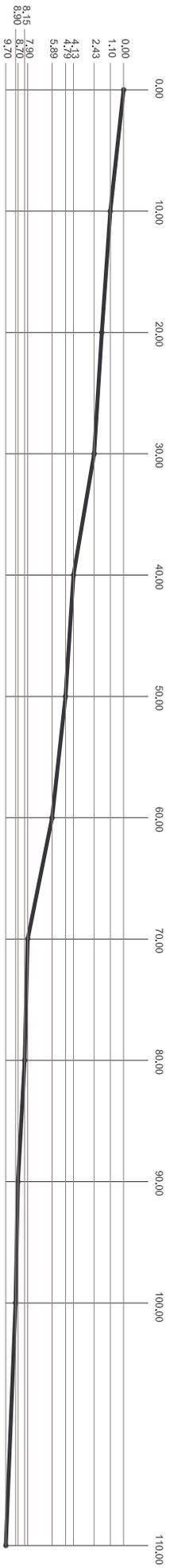
Parámetros	Dimensionales	Fecha máxima de cumplimiento	
		Treinta y uno de agosto de dos mil once	Treinta de junio de dos mil trece
		Uno	Dos
Temperatura	Grados Celsius	Menor de 25	Menor de 25
Grasas y aceites	Miligramos por litro	25	10
Materia flotante	Ausencia/presencia	Ausente	Ausente
Demanda bioquímica de oxígeno	Miligramos por litro	75	50
Demanda química de oxígeno	Miligramos por litro	150	100
Sólidos suspendidos	Miligramos por litro	100	60
Nitrógeno total	Miligramos por litro	25	10
Fósforo total	Miligramos por litro	15	5
Potencial de hidrógeno	Unidades de potencial de hidrógeno	6-9	6-9
Coliformes fecales	Número más probable en cien mililitros	$< 1 \times 10^4$	$< 1 \times 10^4$
Color aparente	Unidades platino cobalto	500	300

Fuente: Diario de Centroamérica, 17 de enero de 2011

Anexo 12. **Levantamiento topográfico del área en estudio**

El levantamiento topográfico del área en estudio fue elaborado por Alejandro Cruz, dibujante de Post-cosecha de ANACAFE y contiene los siguientes planos:

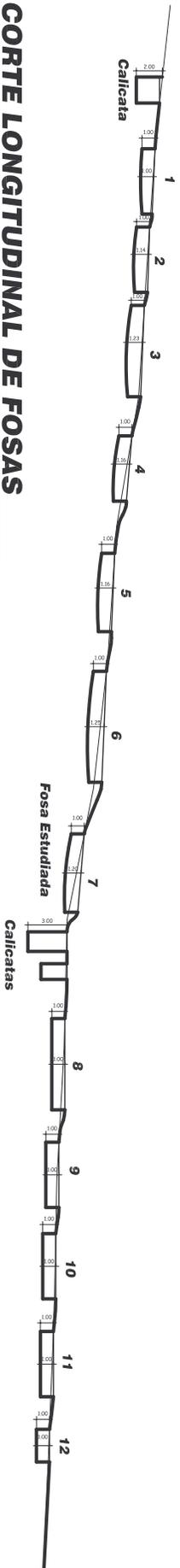
- Corte natural
- Corte longitudinal de fosas
- Planta acotada
- Detalle de la fosa estudiada
- Corte de terreno transversal



CORTE NATURAL

PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

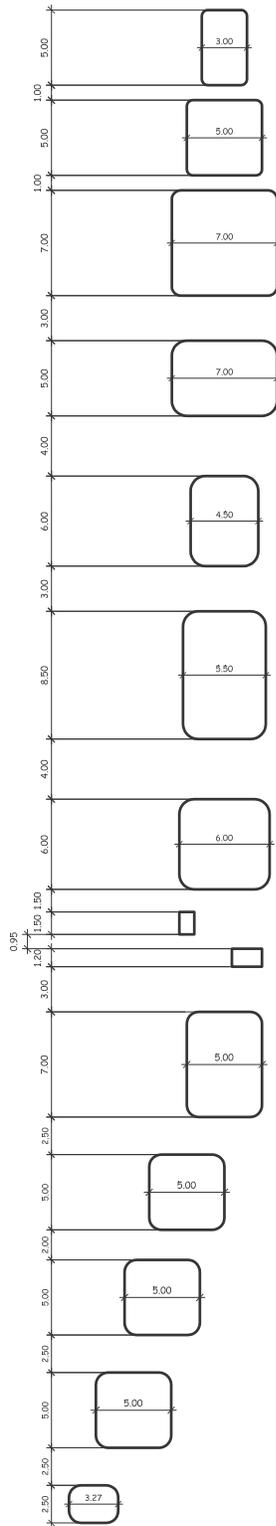
ESCALA 1:125



CORTE LONGITUDINAL DE FOSAS

PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

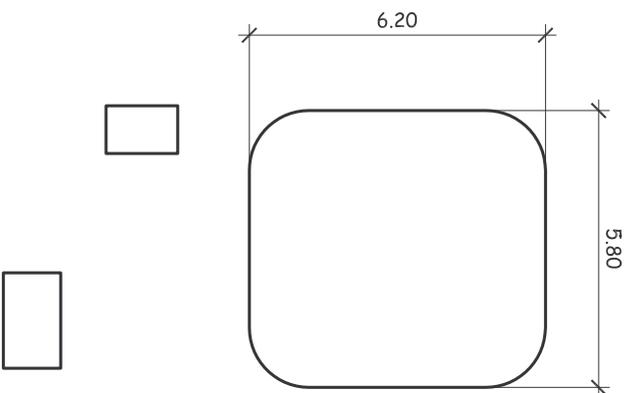
ESCALA 1:125



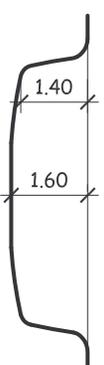
PLANTA ACOTADA

PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

ESCALA 1:200



PLANTA

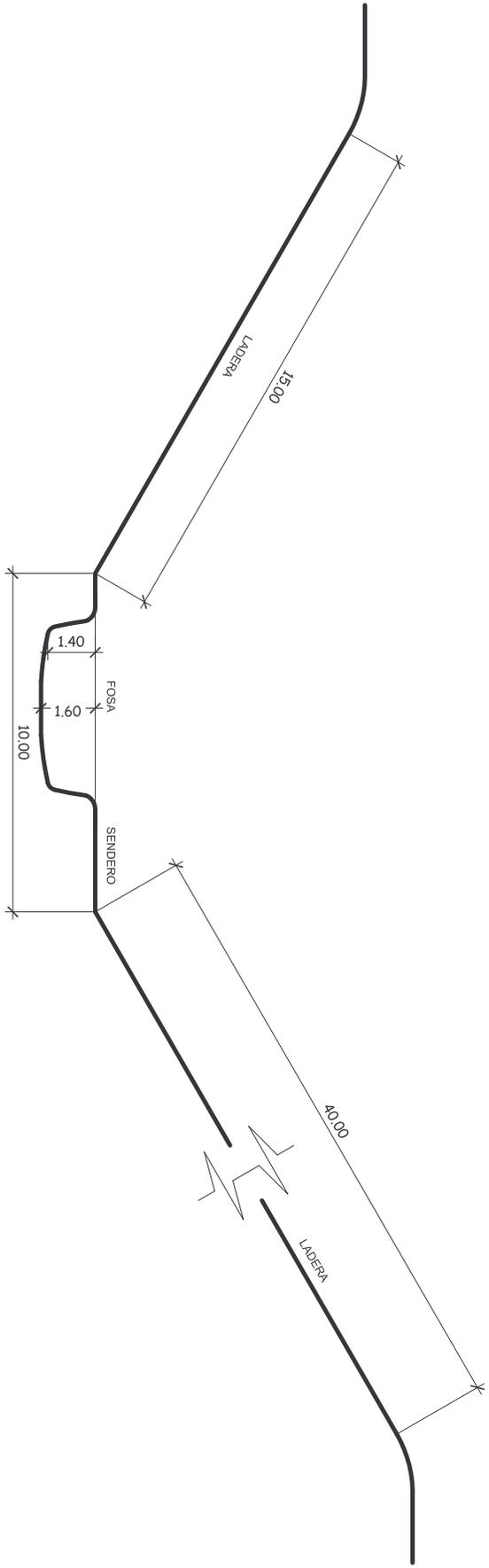


SECCION

DETALLE DE FOSA ESTUDIADA

PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

ESCALA 1:200



CORTE DE TERRENO TRANSVERSAL

PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

ESCALA 1:50