



Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos
Hidráulicos (ERIS)

**EL USO DEL SISTEMA DE FILTRACIÓN EN BLOQUES DE SUELO COMO TRATAMIENTO
SECUNDARIO DE AGUAS RESIDUALES EN COMUNIDADES RURALES**

Ing. Alejandro Quirós Ivankovich

Asesorado por el M.Sc. Ing. Adán Pocasangre Collazos

Guatemala, septiembre de 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EL USO DEL SISTEMA DE FILTRACIÓN EN BLOQUES DE SUELO COMO TRATAMIENTO
SECUNDARIO DE AGUAS RESIDUALES EN COMUNIDADES RURALES**

ESTUDIO ESPECIAL

PRESENTADO A LA ESCUELA REGIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA Y
RECURSOS HIDRÁULICOS (ERIS)

POR

ING. ALEJANDRO QUIRÓS IVANKOVICH

ASESORADO POR EL M.SC. ING. ADÁN POCASANGRE COLLAZOS

COMO REQUISITO PREVIO PARA OPTAR AL GRADO ACADEMICO DE
**MAESTRO (MAGISTER SCIENTIFICAE) EN CIENCIAS
DE INGENIERÍA SANITARIA**

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

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

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN DE ESTUDIO ESPECIAL

EXAMINADOR	MSc. Ing. Adán Pocasangre Collazos
EXAMINADOR	MSc. Ing. Julián Duarte Jiménez
EXAMINADOR	Dr. Ing. Dennis Argueta Mayorga

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:

EL USO DEL SISTEMA DE FILTRACIÓN EN BLOQUES DE SUELO COMO TRATAMIENTO SECUNDARIO DE AGUAS RESIDUALES EN COMUNIDADES RURALES

Tema que me fuera aprobado por la Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado de la Escuela de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, con fecha 27 de mayo de 2020.

Alejandro Quirós Ivankovich

Correo electrónico: aquirosscv@gmail.com
Carné: 202090316



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

EIC Escuela de
Ingeniería Civil

15 de setiembre del 2021

M.Sc. Ing. Pedro Saravia Celis
Director
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ingeniero:

Reciba un cordial saludo de parte de la Escuela de Ingeniería Civil (EIC) de la Universidad de Costa Rica (UCR), y sirva la presente carta a manera de constancia de que el Ing. Alejandro Quirós Ivankovich ha completado satisfactoriamente su trabajo de tesis de maestría, en colaboración con la UCR, durante el primer semestre del año 2021.

El estudiante realizó muestreos en los pilotos ubicados en la planta de tratamiento de la ASADA Poás de Aserrí y efectuó análisis de las muestras en el laboratorio de Ingeniería Ambiental de la EIC, como parte de su evaluación acerca del uso del sistema de filtración en bloques de suelo (*Multi Soil Layering System*) como tratamiento secundario de aguas residuales en comunidades rurales.

Las pruebas se realizaron de enero a junio del presente año.

Se suscribe cordialmente.

PAOLA
VIDAL
RIVERA
(FIRMA)

Firmado
digitalmente por
PAOLA VIDAL
RIVERA (FIRMA)
Fecha: 2021.09.15
11:37:32 -06'00'

Ing. Paola Vidal Rivera
Coordinadora
Laboratorio de Ingeniería Ambiental EIC, UCR



ESCUELA REGIONAL DE INGENIERÍA
SANITARIA Y RECURSOS HIDRÁULICOS
FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

Guatemala, 17 de septiembre 2021

Señores Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS):

Respetuosamente les comunico que he revisado y aprobado, en mi calidad de asesor y coordinador de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Sanitaria, el informe final del Estudio Especial titulado:

**EL USO DEL SISTEMA DE FILTRACIÓN EN BLOQUES DE SUELO COMO
TRATAMIENTO SECUNDARIO DE AGUAS RESIDUALES EN
COMUNIDADES RURALES**

Presentado por el estudiante:

Ing. Alejandro Quirós Ivankovich

Les manifiesto que el estudiante cumplió en forma satisfactoria con todos los requisitos establecidos por la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos - ERIS- y por la Universidad de San Carlos de Guatemala en la realización de su estudio. Agradeciéndoles de antemano la atención a la presente, se suscribe de ustedes,

Atentamente,
“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

**Adan Pocasangre
Collazos**

Firmado digitalmente por
Adan Pocasangre Collazos
Fecha: 2021.09.17
08:16:10 -06'00'

M.Sc. Ing. Adán Ernesto Pocasangre
Coordinador Maestría en Ciencias en Ingeniería Sanitaria



ERIS

ESCUELA REGIONAL DE INGENIERÍA
SANITARIA Y RECURSOS HIDRÁULICOS
FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

Guatemala, 20 de septiembre de 2021

El director de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos - ERIS- después de conocer el dictamen del tribunal examinador integrado por los profesores siguientes: M.Sc. Ing. Adán Pocasangre Collazos, M.Sc. Ing. Julián Duarte Jiménez y, Dr. Ing. Dennis Argueta, así como el visto bueno del Coordinador de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Sanitaria; M.Sc. Ing. Adán Pocasangre Collazos y la revisión lingüística realizada por Licenciada Jéssica Melgarejo Monterroso, Colegiada No. 27003, al trabajo del estudiante Ing. Alejandro Quirós Ivankovich, titulado: EL USO DEL SISTEMA DE FILTRACIÓN EN BLOQUES DE SUELO COMO TRATAMIENTO SECUNDARIO DE AGUAS RESIDUALES EN COMUNIDADES RURALES. En representación de la Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado, procede a la autorización del mismo, en Guatemala a los veinte días del mes de septiembre de 2021.

Imprimase.

ID Y ENSAÑAD A TODOS

Ing. M.Sc. Pedro Saravia Celis
Director

Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

ACTO QUE DEDICO A:

Santísima Trinidad

Por todas las gracias recibidas.

Mis padres

Víctor Quirós y Sonia Ivankovich, mi ejemplo y apoyo.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por permitirme vivir esta experiencia y acompañarme en el camino.
DAAD	Por su ayuda, sin la cual no podría haber cursado esta maestría.
AyA	Por permitirme esta oportunidad para mejorar como profesional.
UCR	Por acogerme de nuevo, esta vez para la realización de este estudio especial.
ERIS	Por los conocimientos que me ha brindado y las personas que he conocido en esta Escuela.
ASADA Poás de Aserri	Por permitirme utilizar sus instalaciones y toda la ayuda que me han brindado.
María Elena Alvarado	Que me ha apoyado, escuchado y ayudado durante la realización de este estudio especial.
Víctor Quirós	Quien me ayudó enormemente en la realización de este proyecto.
Roy González	Por su gran ayuda durante nuestros estudios.

Andrés Rojas	Por su múltiple ayuda durante la realización de este estudio especial.
IMNSA	Por permitirme utilizar sus laboratorios para la caracterización de materiales.
Laura Torres	Quien me ha apoyado en todo momento respecto al estudio de esta maestría.
Paola Vidal	Quien, por segunda vez, ha sido mi tutora en la elaboración de una tesis.
Dagoberto Oviedo	Por su constante apoyo en el laboratorio de Ingeniería Ambiental de la EIC, UCR.
Mis hermanas	Quienes me han apoyado y me ayudaron a instalar los pilotos para este estudio.
Personal de ERIS	Por los conocimientos y orientaciones brindadas durante estos dos años.
Compañeros de ERIS	Por su amistad, su hospitalidad y por lo que aprendí de ellos.
Ilena Vega y el LNA	Por ayudarme con ensayos de calidad de aguas residuales para este estudio.
Amigos	Por su ayuda en visitas de campo y otros favores que me permitieron realizar esta tesis.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
GLOSARIO	XIII
RESUMEN.....	XVII
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XIX
JUSTIFICACIÓN.....	XXI
OBJETIVOS.....	XXIII
HIPÓTESIS.....	XXIV
ANTECEDENTES.....	XXV
ALCANCE Y LIMITACIONES	XXVII
INTRODUCCIÓN.....	XXIX
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. Aguas residuales	1
1.1.1. Agua residual de tipo ordinario	1
1.1.2. Agua residual de tipo especial.....	1
1.1.3. Aguas residuales domésticas	2
1.1.4. Aguas residuales industriales	3
1.2. Caracterización de aguas residuales.....	4
1.2.1. Composición de las aguas residuales domésticas	4
1.2.2. Parámetros de calidad de aguas residuales.....	6
1.2.2.1. Temperatura	6
1.2.2.2. Potencial de Hidrógeno (pH).....	6
1.2.2.3. Sólidos totales (ST)	7

1.2.2.4.	Sólidos suspendidos totales (SST).....	8
1.2.2.5.	Sólidos sedimentables	8
1.2.2.6.	Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO _{5,20})	8
1.2.2.7.	Demanda Química de Oxígeno (DQO).....	9
1.2.2.8.	Grasas y aceites (GyA)	9
1.2.2.9.	Sustancias activas al azul de Metileno (SAAM)	10
1.2.2.10.	Nitrógeno (N).....	10
1.2.2.11.	Fósforo (P)	11
1.2.3.	Valores típicos de contaminantes en aguas residuales domésticas.....	12
1.2.4.	Valores máximos permisibles según el RVRAR.....	13
1.3.	Tratamiento de aguas residuales.....	14
1.3.1.	Procesos que intervienen.....	14
1.3.1.1.	Procesos físicos	15
1.3.1.2.	Procesos químicos.....	15
1.3.1.3.	Procesos biológicos	15
1.3.2.	Plantas de tratamiento de aguas residuales.....	16
1.3.3.	Sistemas de tratamiento de aguas residuales para zonas rurales.....	18
1.3.3.1.	Sistemas de tratamiento individuales o descentralizados	19
1.3.3.2.	Sistemas de tratamiento colectivos o centralizados	20
1.3.4.	Uso de suelo en sistemas de tratamiento de aguas.....	21

1.4.	Sistema de filtración en bloques de suelo o <i>Multi Soil Layering</i> (MSL).....	22
1.4.1.	Descripción del sistema.....	23
1.4.1.1.	Principios básicos.....	24
1.4.1.2.	Disposición.....	24
1.4.2.	Dimensiones.....	25
1.4.3.	Materiales.....	26
1.4.3.1.	Bloques de suelo.....	26
1.4.3.2.	Capas permeables.....	27
1.4.4.	Aireación.....	28
1.4.5.	Procesos que se llevan a cabo en el sistema.....	29
1.4.5.1.	Remoción de materia orgánica.....	31
1.4.5.2.	Remoción de Nitrógeno.....	31
1.4.5.3.	Remoción de Fósforo.....	32
1.4.6.	Carga hidráulica y remoción esperada.....	33
1.4.7.	Selección del tratamiento previo.....	33
2.	METODOLOGÍA.....	35
2.1.	Localización.....	35
2.1.1.	Características socioeconómicas de la población ..	36
2.1.2.	Características de la PTAR.....	38
2.2.	Sistemas piloto.....	40
2.2.1.	Descripción.....	40
2.2.2.	Componentes.....	41
2.2.2.1.	Estañones.....	41
2.2.2.2.	Fondo falso.....	42
2.2.2.3.	Bloques de suelo.....	42
2.2.2.4.	Material permeable.....	44
2.2.2.5.	Sistema para distribución de caudal	45

	2.2.2.6.	Sistema de aireación.....	47
	2.2.3.	Materiales.....	49
	2.2.4.	Diseño final de los pilotos.....	50
	2.2.5.	Instalación de los pilotos	52
	2.2.6.	Operación y mantenimiento.....	53
2.3.		Evaluación del funcionamiento.....	53
	2.3.1.	Parámetros de control	53
	2.3.2.	Número de muestras.....	55
	2.3.3.	Puntos de muestreo	59
	2.3.4.	Tipo de muestra	61
	2.3.5.	Frecuencia de muestreo.....	61
	2.3.6.	Procesamiento de los datos obtenidos.....	61
2.4.		Evaluación de la viabilidad de un sistema de tratamiento de aguas residuales	62
	2.4.1.	Viabilidad técnica	62
	2.4.2.	Viabilidad económica	63
3.		RESULTADOS.....	65
	3.1.	Caracterización de los materiales	65
	3.2.	Agua residual cruda	66
	3.3.	Proceso de estabilización biológica	67
	3.4.	Resultados parámetros de calidad de aguas residuales.....	68
	3.4.1.	Caudal.....	69
	3.4.2.	Temperatura.....	70
	3.4.3.	pH.....	71
	3.4.4.	Oxígeno disuelto	72
	3.4.5.	DBO	73
	3.4.6.	DQO	74
	3.4.7.	SST	75

3.4.8.	SDT	76
3.4.9.	Sólidos totales	77
3.4.10.	Fósforo reactivo	78
3.4.11.	Nitrógeno	79
	3.4.11.1. Nitrógeno amoniacal	79
	3.4.11.2. Nitratos	80
	3.4.11.3. Nitritos	81
3.4.12.	Turbiedad.....	82
3.4.13.	Color	83
3.5.	Resultados estimación de costos	84
3.5.1.	Costos de construcción	84
3.5.2.	Costos de operación y mantenimiento.....	87
3.5.3.	Tarifa estimada	89
4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	91
4.1.	Discusión parámetros de calidad de aguas residuales.....	91
4.1.1.	Caudal	91
4.1.2.	Temperatura	93
4.1.3.	pH	95
4.1.4.	Oxígeno disuelto.....	97
4.1.5.	DBO.....	99
4.1.6.	DQO	102
4.1.7.	Relación DBO/DQO.....	104
4.1.8.	SST.....	105
4.1.9.	Fósforo	107
	4.1.9.1. Fósforo reactivo	107
	4.1.9.2. Fósforo total.....	110
4.1.10.	Nitrógeno	111
	4.1.10.1. Nitrógeno amoniacal.....	111

4.1.10.2.	Nitratos.....	113
4.1.10.3.	Nitritos	115
4.1.10.4.	Nitrógeno Kjeldahl	117
4.1.10.5.	Nitrógeno total	117
4.1.11.	Turbiedad	122
4.1.12.	Color.....	124
4.1.13.	Sustancias activas al azul de metileno.....	125
4.2.	Comparación de parámetros con estudios previos en sistemas MSL.....	126
4.2.1.	Comparación de parámetros del agua de entrada	126
4.2.2.	Comparación de cargas hidráulicas en los pilotos MSL.....	127
4.2.3.	Comparación de eficiencias de remoción mostradas.....	127
4.3.	Discusión estimación de costos	129
4.3.1.	Costos de construcción	129
4.3.2.	Costos de operación y mantenimiento	130
4.3.3.	Tarifa estimada y tarifas existentes	132
4.3.4.	Capacidad de pago	134
CONCLUSIONES.....		137
RECOMENDACIONES		139
BIBLIOGRAFÍA.....		141
APÉNDICES.....		151
ANEXOS.....		171

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Clasificación de los sólidos según sus características físicas y composición	7
2.	Esquema de procesos de tratamiento en una PTAR	17
3.	Esquema típico de un sistema MSL	25
4.	Mecanismos en un sistema MSL	30
5.	Fotografía satelital de la ubicación del proyecto	36
6.	Fotografía de vista general de la PTAR Los Cenízaros	39
7.	Esquema de funcionamiento de la PTAR Los Cenízaros.....	39
8.	Esquema ilustrativo de piloto MSL	40
9.	Estañón utilizado para los pilotos.....	41
10.	Fotografía de fondo falso en los pilotos.....	42
11.	Fotografía de bloques de suelo utilizados en los pilotos	43
12.	Fotografías del material permeable utilizado en los pilotos.....	44
13.	Esquema del sistema de distribución de caudal	46
14.	Cuadrícula de tubería para distribución de caudal sobre cada piloto... ..	47
15.	Fotografías de sistemas de aireación utilizados en los pilotos.....	48
16.	Esquema de diseño final de pilotos con piedra	50
17.	Esquema de diseño final de pilotos con antracita	51
18.	Fotografías de pilotos instalados en la PTAR Los Cenízaros	52
19.	Gráfica para estimar número de muestras por utilizar.....	57
20.	Punto de muestreo antes de los pilotos	60
21.	Punto de muestreo después de cada piloto	60
22.	Esquema de distribución PTAR para estimación de costos	85

23.	Gráfico de carga hidráulica superficial para los pilotos MSL.....	92
24.	Gráfico de temperatura para los pilotos MSL.....	94
25.	Gráfico de pH para los pilotos MSL	96
26.	Gráfico de oxígeno disuelto para los pilotos MSL.....	98
27.	Gráfico de DBO para los pilotos MSL	100
28.	Gráfico de DQO para los pilotos MSL.....	102
29.	Gráfico de SST para los pilotos MSL.....	106
30.	Gráfico de P reactivo para los pilotos MSL	108
31.	Esquema de ciclo del nitrógeno en aguas residuales	111
32.	Gráfico de N amoniacal para los pilotos MSL	112
33.	Gráfico de Nitratos para los pilotos MSL.....	114
34.	Gráfico de Nitritos para los pilotos MSL.....	116
35.	Gráfico de Nitrógeno total para los pilotos MSL.....	118
36.	Esquema acumulación de materia orgánica en capas, sistema MSL .	121
37.	Gráfico de turbiedad para los pilotos MSL.....	123
38.	Gráfico de color aparente para los pilotos MSL	124

TABLAS

I.	Factores que influyen cantidad de agua residual de origen doméstico.....	3
II.	Principales contaminantes de interés para el tratamiento de agua	5
III.	Composición típica del agua residual doméstica cruda.....	13
IV.	Límites de parámetros de muestreo obligatorio según RVRAR	14
V.	Componentes y sus funciones en un sistema MSL.....	30
VI.	Forma de obtención de los materiales para los pilotos	49
VII.	Numeración y características de cada piloto instalado.....	51
VIII.	Cálculo de número de muestras para diferentes parámetros.....	58
IX.	Resumen de resultados de caracterización de materiales	66
X.	Parámetros de calidad del agua residual cruda, Urb. Los Cenízaros ..	67
XI.	Fechas y horas de los muestreos realizados	68
XII.	Resultados de caudal para los pilotos MSL	69
XIII.	Resultados de temperatura para los pilotos MSL.....	70
XIV.	Resultados de pH para los pilotos MSL	71
XV.	Resultados de oxígeno disuelto para los pilotos MSL.....	72
XVI.	Resultados de DBO para los pilotos MSL	73
XVII.	Resultados de DQO para los pilotos MSL.....	74
XVIII.	Resultados de SST para los pilotos MSL.....	75
XIX.	Resultados de SDT para los pilotos MSL.....	76
XX.	Resultados de sólidos totales para los pilotos MSL	77
XXI.	Resultados de Fósforo reactivo para los pilotos MSL	78
XXII.	Resultados de nitrógeno amoniacal para los pilotos MSL.....	79
XXIII.	Resultados de nitratos para los pilotos MSL	80
XXIV.	Resultados de nitritos para los pilotos MSL	81
XXV.	Resultados de turbiedad para los pilotos MSL	82
XXVI.	Resultados de color aparente para los pilotos MSL	83

XXVII.	Resumen de presupuesto para la PTAR propuesta.....	86
XXVIII.	Costos mensuales para OyM de PTAR propuesta	88
XXIX.	Resumen de resultados para caudal en los pilotos MSL	92
XXX.	Resumen de resultados para temperatura en los pilotos MSL	94
XXXI.	Resumen de resultados para pH en los pilotos MSL	96
XXXII.	Resumen de resultados para oxígeno disuelto en los pilotos MSL.....	98
XXXIII.	Resumen de resultados para DBO en los pilotos MSL.....	100
XXXIV.	Resumen de resultados para DQO en los pilotos MSL.....	102
XXXV.	Resultados de relación DBO/DQO para los pilotos MSL	104
XXXVI.	Resumen de resultados para SST en los pilotos MSL.....	105
XXXVII.	Resumen de resultados para P reactivo en los pilotos MSL.....	108
XXXVIII.	Resultados de P total para los pilotos MSL	110
XXXIX.	Resumen de resultados para N amoniacal en los pilotos MSL.....	112
XL.	Resumen de resultados para Nitratos en los pilotos MSL	114
XLI.	Resumen de resultados para Nitritos en los pilotos MSL.....	115
XLII.	Resultados para N Kjeldahl en los pilotos MSL	117
XLIII.	Resultados para N total en los pilotos MSL	118
XLIV.	Resumen de resultados para turbiedad en los pilotos MSL.....	122
XLV.	Resumen de resultados para color aparente en los pilotos MSL.....	124
XLVI.	Resultados para SAAM en los pilotos MSL	125
XLVII.	Comparación de parámetros de calidad del agua de entrada	126
XLVIII.	Comparación de costos de construcción para PTAR MSL y otra PTAR.....	130
XLIX.	Comparación costos mensuales de OyM para diferentes PTAR	131
L.	Comparación tarifas aprobadas en Costa Rica para alcantarillado	133
LI.	Ingresos mensuales por hogar según zona en Costa Rica.....	134
LII.	Gastos mensuales por hogar según zona en Costa Rica	135

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
NH₃-N	Amoniac como nitrógeno
Q	Caudal
cm	Centímetro
₡	Colones
\$	Dólares
PO₄³⁻-P	Fosfatos como fósforo
°C	Grados Celsius
hab	Habitantes
L	Litro
m	Metro
m²	Metros cuadrados
m³	Metro cúbico
mg	Miligramos
mm	Milímetro
NO₃⁻-N	Nitratos como nitrógeno
NO₂⁻-N	Nitritos como nitrógeno
N.D.	No detectable
OD	Oxígeno disuelto
P1	Piloto 1
P2	Piloto 2
P3	Piloto 3
P4	Piloto 4

pH	Potencial de Hidrógeno
s	Segundos
SDT	Sólidos disueltos totales
SST	Sólidos suspendidos totales
ST	Sólidos totales
U Pt-Co	Unidades de Platino-Cobalto

GLOSARIO

Agua residual cruda	Agua residual sin tratamiento, que ingresa a una planta de tratamiento.
Antracita	Carbón mineral metamorfizado.
ARESEP	Autoridad reguladora de los servicios públicos.
ASADA	Asociación administradora de los Sistemas de Acueducto y Alcantarillado Sanitario.
AyA	Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados.
Carbón activado	Carbón que ha sido sometido a un proceso físico o químico que aumenta su área superficial y porosidad.
CHS	Carga Hidráulica Superficial.
DBO (5,20)	Demanda Bioquímica de Oxígeno después de 5 días, a 20 °C.
Desnitrificación	Es un proceso biológico que tiene lugar en ausencia de oxígeno, en el que el nitrato se transforma en nitrógeno gaseoso.

DQO	Demanda Química de Oxígeno.
ESPH	Empresa de servicios públicos de Heredia.
FAU	Unidad de Atenuación de Formacina
GyA	Grasas y aceites.
INEC	Instituto Nacional de Estadística y Censos (Costa Rica).
LNA	Laboratorio Nacional de Aguas (Costa Rica).
Multi Soil Layering	Filtración en bloques de suelo (MSL).
Nitrificación	La nitrificación es la oxidación biológica de amonio con oxígeno para dar nitrito, seguida por la oxidación de esos nitritos a nitratos.
Nitrógeno amoniacal	Nitrógeno en cantidad de iones amonio, derivados naturalmente del amoníaco, y regresado a amoníaco por procesos orgánicos.
Nitrógeno Kjeldahl	Es la suma de nitrógeno orgánico, amoníaco y amonio.
OyM	Operación y Mantenimiento.
PTAR	Planta de tratamiento de aguas residuales.

PVC	Policloruro de vinilo.
RAFA	Reactor anaeróbico de flujo ascendente.
RVRAR	Reglamento de vertido y reúso de aguas residuales (Costa Rica).
SAAM	Sustancias activas al azul de metileno.
UCR	Universidad de Costa Rica.

RESUMEN

El presente estudio tiene como objetivo evaluar la capacidad de un sistema de filtración en bloques de suelo o *Multi Soil Layering* (MSL) para remover contaminantes, al ser utilizado como tratamiento secundario de aguas residuales domésticas en una zona rural. Así mismo, se desea determinar la viabilidad económica de aplicar un sistema MSL como tratamiento colectivo de aguas residuales para una comunidad rural en Costa Rica, cuyos servicios de agua sean administrados de forma comunal.

Para la realización del estudio se construyeron cuatro pilotos, los cuales reciben el efluente de un RAFA que cuenta con un pretratamiento previo. Estos pilotos se encuentran en estañones de 60 cm de diámetro y alternan capas de material permeable y bloques de suelo, hasta alcanzar una altura de 80 cm. Se miden parámetros de calidad a la entrada y salida de los sistemas, tales como pH, DBO, DQO, SST, N, P, entre otros.

Todos los pilotos lograron cumplir con los límites establecidos en el RVRAR, y se lograron porcentajes de remoción de al menos 75 % para DBO, DQO, SST, de al menos 50 % para Nitrógeno total y de al menos 30 % para Fósforo total. Sin embargo, estos parámetros son considerablemente mejores en algunos de los cuatro pilotos probados en el estudio.

La estimación económica mostró que los costos de construcción de un sistema MSL para 100 viviendas son hasta 69 % menores que otros sistemas pensados para zonas rurales, y que los costos de OyM son de aproximadamente ₡6,182 por vivienda por mes.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las comunidades rurales de Costa Rica suelen ser las menos desarrolladas en términos de saneamiento de aguas residuales, y enfrentan una serie de dificultades de diversa índole para la implementación de este tipo de sistema. Esto según la experiencia de la Dirección de Gestión de Aguas Residuales de la Subgerencia de Sistemas Comunes del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA). Dicha oficina da seguimiento y asesoría a Asociaciones Administradoras de los Sistemas de Acueductos y Alcantarillados Sanitarios (ASADAS) en comunidades rurales y semi urbanas de Costa Rica.

Las comunidades rurales de Costa Rica presentan problemas de diversa índole para asegurar la sostenibilidad de los sistemas de saneamiento de aguas residuales a lo largo del tiempo. Uno de los principales problemas es la falta de opciones tecnológicas que presenten buen desempeño en depuración, costos de implementación accesibles, áreas requeridas razonables, y bajos costos de operación y mantenimiento.

En ese sentido, se debe intensificar en la región la investigación de tecnologías apropiadas para zonas rurales, lo cual permitirá brindar alternativas sostenibles para la implementación de sistemas de saneamiento colectivos para aguas residuales. Es posible aprovechar, para este fin, la experiencia de investigaciones realizadas en otros países que buscan soluciones para sus poblaciones rurales.

JUSTIFICACIÓN

Este proyecto se centra en la evaluación de una tecnología de tratamiento de aguas residuales, para determinar si su implementación en comunidades rurales es viable y sostenible. Determinar la aplicabilidad de este tipo de tecnologías permitirá ofrecer opciones apropiadas para estas poblaciones, para que los sistemas implementados funcionen durante todo su periodo de diseño.

La sostenibilidad de los sistemas de saneamiento trae múltiples beneficios para una comunidad, incluyendo impactos económicos, sociales y ambientales. Lo anterior constituye una importancia tal, que las Naciones Unidas han definido dentro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) para el 2030, garantizar servicios de saneamiento e higiene adecuados y equitativos para todos¹.

Así mismo, el presente trabajo genera aportes técnicos y metodológicos en una de las principales líneas de investigación de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS). Los aportes son especialmente valiosos en temas relacionados con tratamiento de aguas para zonas rurales, tratamiento mediante uso de suelo y remoción de nutrientes.

No se han realizado estudios del sistema MSL en Latinoamérica, por lo que se consideran valiosos los ensayos del sistema para las condiciones climáticas, y socioculturales propias de una comunidad en Costa Rica. De esta manera, se valida la forma en que se ajusta esta tecnología a la región, y los resultados servirán como insumo para futuras investigaciones en esta zona.

¹ NACIONES UNIDAS. *Objetivo 6: Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos*. p.1.

OBJETIVOS

General

Evaluar la viabilidad de utilizar el sistema de Filtración en Bloques de Suelo (*Multi Soil Layering System*) como tratamiento secundario de aguas residuales domésticas en comunidades rurales de Costa Rica.

Específicos

1. Determinar el desempeño del sistema MSL para remover los principales contaminantes del agua residual doméstica en una comunidad rural.
2. Determinar la viabilidad económica de utilizar el sistema MSL en una comunidad rural.

Hipótesis

H1: El efluente del sistema MSL, utilizado como tratamiento secundario de aguas residuales domésticas en una comunidad, logrará porcentajes de remoción de 75 % para DBO, DQO, SST, y de 50 % para Nitrógeno y Fósforo totales, y cumplirá con los límites establecidos en el Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales de Costa Rica.

ANTECEDENTES

Debido a las particularidades que presentan las comunidades rurales en temas relacionados con saneamiento de aguas, varios libros han expuesto conceptos valiosos a considerar, como es el caso de *Small and Decentralized Wastewater Management Systems* de los autores Crites y Tchobanoglous. Incluso se tiene una fuente originada en un país mucho más cercano a Costa Rica, en la forma de la “Guía RAS. TÍTULO J: Alternativas Tecnológicas en Agua y Saneamiento para el Sector Rural” realizada por el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia.

Así mismo, existen varias investigaciones prácticas realizadas acerca del sistema MSL, estas se sintetizan en artículos de revistas científicas, y se cuenta con acceso a al menos 15 de ellos.

El sistema MSL fue desarrollado en Japón, en los años 90, y se han realizado experimentos en otros países como China, India, Marruecos, Tailandia, Taiwán e Indonesia, todos ellos con resultados prometedores.

Estos estudios suponen un excelente punto de partida para el desarrollo de este proyecto, y se enlistan tres de ellos a manera de ejemplo:

- *Multi-Soil-Layering Systems for Wastewater Treatment in Small and Remote Communities* de los autores An *et al.* en 2015 analiza el método MSL aplicado a comunidades remotas y pequeñas, y es fruto de un esfuerzo conjunto entre investigadores chinos y canadienses.

- *An introduction of a multi-soil-layering system: a novel green technology for wastewater treatment in rural areas* de Chen et al. Fue elaborado en 2009 y supone una aproximación inicial para el uso del método MSL en comunidades rurales de China.
- *Experimental Investigation of Treatment of Domestic Wastewater Using Multi Soil Layering System (MSL)* es un estudio realizado por Deshpande y Thorvat, en la India, en 2018, y se centra en el MSL como sistema para tratar aguas residuales domésticas.

Así mismo, An et al. realizaron una recopilación de numerosos experimentos realizados con distintas tasas de carga hidráulica superficial de ahí se desprende que²:

- Se han realizado pruebas con cargas hidráulicas superficiales que van desde los 200 hasta los 4000 L/m² día.
- En términos generales, se aprecia mayores porcentajes de remoción para cargas hidráulicas menores a 600 L/m² día.
- Porcentajes de remoción para DBO: desde 52.6 hasta 99.8 %.
- Porcentajes de remoción para DQO: desde 22.9 hasta 98.1 %.
- Porcentajes de remoción para sólidos suspendidos totales: desde 32.4 hasta 97.2 %.
- Porcentajes de remoción para Nitrógeno total: desde 22 hasta 99.7 %.
- Porcentajes de remoción para Fósforo total: desde 26.1 hasta 99.1 %.

² AN et al. *Multi-Soil-Layering Systems for Wastewater Treatment in Small and Remote Communities*. p.138.

ALCANCE Y LIMITACIONES

Se tienen casos de estudio en los que se ha utilizado sistemas MSL para el tratamiento de aguas residuales domésticas, e incluso en algunos de ellos las pruebas se han realizado en comunidades rurales. Por esta razón, el alcance de este trabajo es el de determinar la aplicabilidad del sistema en comunidades rurales de Centroamérica.

Dentro de las limitaciones que se han identificado se pueden mencionar:

- La planta de tratamiento que se utiliza para el estudio no se encuentra funcionando de manera óptima.
- Al reactor anaerobio de la PTAR no se le realizan purgas periódicas, por lo que una porción de los lodos flota hasta la parte superior, contaminando el efluente.
- Debido a la investigación relativamente escasa que se ha realizado a nivel mundial acerca del sistema MSL, no se cuenta con un sistema de diseño detallado de las unidades, más allá del área superficial requerida y un rango del tamaño de las capas utilizadas en el filtro.
- Para el desarrollo de la investigación se cuenta con un intervalo de tiempo de aproximadamente 6 meses, por lo que los resultados del sistema durante duraciones mayores no podrán ser analizados en este trabajo.
- El equipo y los reactivos disponibles en el laboratorio utilizado de la UCR durante la realización de esta investigación no permiten medir el fósforo, ni el nitrógeno total de las muestras.

- Algunas condiciones propias de la comunidad, como por ejemplo el clima y el nivel socioeconómico, podrían variar en otras comunidades rurales del país.
- La crisis generada por la pandemia debido al COVID-19 hizo que las actividades presenciales se suspendieran durante algunas semanas de la presente investigación, por lo que se dispuso de menos tiempo para realizar ensayos de laboratorio. Así mismo, los recursos económicos destinados a equipo de laboratorio fueron recortados, por lo que en algunos momentos se tuvo escasez de reactivos.
- No es posible evaluar el funcionamiento a mediano y largo plazo del sistema MSL, en el cual se espera, por ejemplo, que mejore gradualmente la remoción de nitrógeno total.

INTRODUCCIÓN

El tratamiento de aguas residuales constituye uno de los principales desafíos a los que se enfrenta el mundo, y, de manera particular, la ingeniería sanitaria. En el marco del ODS 6, se insta a apoyar y fortalecer la participación de las comunidades locales en la mejora de la gestión del agua y el saneamiento³.

Existen grandes dificultades en las comunidades rurales para acceder a proyectos de saneamiento, y para darle sostenibilidad a los sistemas. Para lograr la sostenibilidad se debe propiciar la participación de la población y la consideración de sus necesidades.

En el caso de Costa Rica, los sistemas de agua potable y saneamiento en zonas rurales son manejados por organismos comunales llamados ASADAS, las cuales realizan grandes esfuerzos para llevar a cabo su importante labor. Las tecnologías para proyectos de tratamiento de aguas residuales en dichas comunidades serán viables en cuanto consideren las particularidades técnicas, económicas y sociales de estos poblados, además de respetar los aspectos legales y ambientales pertinentes.

Es por estas razones que en este proyecto se investiga acerca de una tecnología de depuración de aguas residuales novedosa, cuyas características la hacen ideal para ser aplicada en zonas rurales y de manera colectiva. Las investigaciones realizadas en países asiáticos y africanos han mostrado resultados prometedores al tratar aguas residuales domésticas mediante el

³ Naciones Unidas. *Objetivo 6: Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos*. p.2.

sistema de Filtración en Bloques de Suelo (MSL), eliminando gran cantidad de materia orgánica, sólidos suspendidos, nutrientes, entre otros contaminantes.

El sistema MSL se puede construir a bajo costo, con materiales locales, ofreciendo un buen desempeño y una operación y mantenimiento sencillas y baratas. Se utiliza como tratamiento secundario, requiriendo un área varias veces menor que otras tecnologías típicamente recomendadas para poblaciones rurales, como por ejemplo lagunas y humedales.

Mediante la presente investigación se pretende ampliar el conocimiento actual y determinar la aplicabilidad de este sistema de tratamiento, de manera que se acerque cada vez más a convertirse en una opción viable para comunidades de Centroamérica.

Se espera que los resultados de implementar un sistema MSL en Costa Rica comprueben que es posible cumplir la legislación vigente para vertidos. También se estima que los costos de implementación, operación y mantenimiento serán menores que los de otras tecnologías utilizadas en la región.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Aguas residuales

Se llama agua residual al agua que ha recibido un uso y cuya calidad ha sido modificada por la incorporación de agentes contaminantes⁴. Por lo que constantemente el ser humano se encuentra generando aguas residuales mediante las actividades que realiza en sus labores domésticas, agrícolas, comerciales, industriales, de salud, entre otras.

Una clasificación ampliamente difundida de las aguas residuales las agrupa en dos grandes conjuntos llamados agua residual ordinaria y agua residual especial. Otras clasificaciones las agrupan según el tipo de actividad que la origina: doméstico, industrial, comercial agrícola, u otros.

1.1.1. Agua residual de tipo ordinario

MINAE y MINSA definen el agua residual ordinaria como aquella que es generada por las actividades domésticas del hombre (uso de inodoros, duchas, lavatorios, fregaderos, lavado de ropa, entre otros.)

1.1.2. Agua residual de tipo especial

Se define como todas las aguas residuales que no son de tipo ordinario, y, por lo tanto, constituye una clasificación muy amplia, ya que es producida por

⁴ MINAE y MINSA. *DE-No 33601: Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales*. p.2.

todo tipo de actividades que no son las típicas desarrolladas en un hogar. Esto implica que las aguas residuales especiales no son necesariamente más contaminadas o peligrosas que las ordinarias, ya que esto depende de los elementos que le son agregados durante la actividad en cuestión.

Sin embargo, dentro de la clasificación de aguas residuales especiales sí se encuentran casos delicados como, por ejemplo: el desecho líquido de centros de salud, industrias químicas y actividades con uso de metales pesados.

1.1.3. Aguas residuales domésticas

Son aquellas generadas en viviendas, debido a las actividades típicas diarias, por lo que son a la vez aguas residuales ordinarias.

Esta particularidad hace que las aguas residuales domésticas sean relativamente similares de una población a otra, y que su producción y características se encuentren dentro de unos rangos conocidos. Por lo general, la producción y características del agua residual de un hogar pueden ser predichas por su servicio de agua potable, nivel de ingresos, costumbres culturales y clima de la región.

Algunos factores influyentes en la cantidad producida son resumidos en la tabla I.

Tabla I. **Factores que influyen en la cantidad del agua residual de origen doméstico**

Factores influyentes	Efecto en la cantidad de aguas residuales domésticas	
	Reducción	Incremento
Mejores niveles de vida		X
Mayor densidad de viviendas		X
Grandes residencias	X	
Áreas más industrializadas		X
Barrios residenciales		X
Viviendas de carácter social	X	
Áreas agrícolas sin irrigación	X	
Clima cálido		X
Amplios recursos hídricos		X
Baja calidad de agua	X	
Mayor presión en la red de abastecimiento		X
Medición del uso del agua	X	
Tarifa de agua más elevada	X	
Expansión del sistema de alcantarillado		X

Fuente: elaboración propia, adaptado de *Presentaciones del curso: Alcantarillado e Instalaciones Sanitarias en Edificios y Poblaciones*. p.6.

La variación horaria del caudal de aguas residuales domésticas también suele ser, hasta cierto punto, predecible, y depende primordialmente del tamaño de la comunidad analizada.

1.1.4. Aguas residuales industriales

Son aquellas generadas en las industrias debido a los procesos de producción, y su cantidad, características y comportamiento horario de su caudal, varían enormemente de una industria a otra.

Si se tiene una industria textil podrían producirse aguas con colorantes, una industria alimenticia generaría aguas con grasas y aceites, y una industria embotelladora de agua debería generar un agua residual con pocos contaminantes.

Así mismo, la cantidad de caudal variará entre una industria pequeña, mediana o grande, y de la demanda de agua para producir el elemento o proceso deseado. Por ejemplo, un beneficio húmedo de café generará una cantidad mucho mayor de aguas residuales que un beneficio seco de café, debido a las diferencias en el proceso que se ejecuta.

1.2. Caracterización de aguas residuales

Para caracterizar las aguas residuales se analizan los contaminantes presentes en el líquido y su concentración. Existen parámetros típicos que son medidos en las aguas residuales para determinar su composición.

1.2.1. Composición de las aguas residuales domésticas

Metcalf y Eddy indica que la composición de las aguas residuales incluye constituyentes físicos, químicos y biológicos. La descripción de dicha composición puede ser tan extensa como se quiera, incluyendo aspectos como su temperatura, color, olor, sólidos, carbohidratos, grasas, pH, gases, nutrientes, bacterias, virus, plantas, entre otros muchos componentes.⁵

Sin embargo, en el caso de tratamiento de aguas residuales, se suele utilizar principalmente la concentración de contaminantes como forma de

⁵ METCALF y EDDY. *Ingeniería de Aguas residuales: Tratamiento, vertido y reutilización*. p.53.

caracterizar el agua en estudio. Esto corresponde con la parte que se desea remover, y permite comparar con los valores establecidos en leyes y reglamentos ambientales y de salud. Algunos contaminantes de interés en el estudio de las aguas residuales domésticas son mostrados en la tabla II.

Tabla II. **Principales contaminantes de interés para el tratamiento de agua**

Contaminantes	Importancia
Sólidos en suspensión	Los sólidos en suspensión pueden dar lugar al desarrollo de lodos y condiciones anaeróbicas si se vierte en un cuerpo receptor.
Materia orgánica biodegradable	Se compone principalmente de proteínas, carbohidratos y grasas. Si se descargan al entorno sin tratar, su estabilización biológica puede agotar el oxígeno disponible y generar condiciones sépticas. La materia orgánica biodegradable se suele medir mediante DBO y DQO.
Patógenos	Pueden transmitirse enfermedades contagiosas por medio de organismos patógenos presentes en el agua residual.
Nutrientes	Principalmente se contempla el Nitrógeno, Fósforo y Carbono. Cuando se vierten al entorno acuático, estos nutrientes pueden favorecer el crecimiento de plantas no deseadas. Cuando se vierten al terreno en cantidades excesivas, también pueden provocar la contaminación del agua subterránea.
Metales pesados	Los metales pesados son más comunes en aguas residuales de procesos industriales y comerciales, son perjudiciales para la salud, el ambiente, y se deben remover en caso de hacer reuso de aguas residuales tratadas.
Sólidos inorgánicos disueltos	Aunque en principio no son peligrosos en cantidades controladas, algunos constituyentes inorgánicos como el calcio, el sodio y los sulfatos generan efectos no deseados en instalaciones y en el ambiente.

Nota: Existen otros contaminantes de interés en algunos procesos de tratamiento de agua residual, sin embargo, se considera que los mencionados son los más significativos.

Fuente: elaboración propia, adaptado de *Ingeniería de Aguas residuales: Tratamiento, vertido y reutilización*. p.56.

1.2.2. Parámetros de calidad de aguas residuales

Para definir de una manera confiable las características del agua residual, se han estandarizado una serie de parámetros y métodos de medición, lo cual permite comparar valores entre muestras y contrastar con la legislación vigente. Se mencionan, a continuación, los parámetros de calidad más importantes para agua residual de tipo ordinario, según lo estipulado en el Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales (RVRAR) de Costa Rica.

1.2.2.1. Temperatura

La temperatura no afecta directamente la calidad del agua, pero, tal como indica Tenorio:

La temperatura puede estar ligada a los procesos químicos o biológicos que se dan en el agua; se puede afirmar que al aumentar la temperatura se provoca un aumento en las reacciones químicas y biológicas, así como de la velocidad de reacción; y una disminución del oxígeno disuelto en el agua.⁶

Así mismo, la temperatura se relaciona con el desarrollo de la vida acuática, y los cambios muy abruptos pueden incidir en la mortalidad de esta. La medición de este parámetro suele hacerse in situ mediante un termómetro.

1.2.2.2. Potencial de Hidrógeno (pH)

Mide la concentración de iones hidrógeno y está asociado directamente con la acidez o alcalinidad de una sustancia. El rango en escala del pH varía entre cero y catorce, siendo de 0 a 7 el rango alcalino, de 7 a 14 el rango ácido y

⁶ TENORIO, Rebeca. *Diseño preliminar del sistema de tratamiento de aguas residuales tipo especial de Finca 1 de la Universidad de Costa Rica, sede Rodrigo Facio*. p.18.

7 el valor neutro, para agua a 25 °C. Por lo general, el pH es desestabilizado por ácidos que se agregan al agua.

La importancia del pH como indicador reside en que determinados procesos químicos solamente pueden ocurrir en un intervalo determinado de este parámetro. Por ejemplo, las reacciones del cloro solo tienen lugar en un rango de pH entre 6,5 y 8.

1.2.2.3. Sólidos totales (ST)

Se refiere a las partículas presentes en el agua y que son más grandes que las moléculas. Su origen es variado y la mayoría no suelen ser distinguidos a simple vista por el ojo humano, son clasificados por su tamaño y su origen, tal como se muestra en la figura 1.

Figura 1. Clasificación de los sólidos según sus características físicas y composición



Fuente: elaboración propia, adaptado de *Sistemas de tratamiento de aguas*. p.10.

1.2.2.4. Sólidos suspendidos totales (SST)

Son partículas visibles y que suelen mantenerse flotando entre la superficie del líquido y el fondo. Pueden ser cuantificados mediante la filtración con un tamiz de 0.45 micras.

Los sólidos suspendidos brindan una idea del impacto que tendrían los sólidos contenidos en el agua residual a la hora de ser vertidos en un cuerpo receptor, cuya acumulación dará lugar a la aparición de efluentes turbios y a la formación de lodos.⁷

1.2.2.5. Sólidos sedimentables

Comprenden un porcentaje de los sólidos suspendidos (ver Figura 1) y se caracterizan por depositarse en el fondo del recipiente que contiene el agua residual. Para su medición se utiliza un cono Imhoff con capacidad de un litro, y se deja sedimentar el contenido durante una hora.

1.2.2.6. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_{5,20})

El agua residual contiene una flora bacteriana, estas bacterias, bajo ciertas condiciones, actuarán degradando la materia orgánica que se encuentra presente en el agua. De manera que, si se crea un sistema cerrado, se podrá cuantificar el oxígeno que es consumido por estas bacterias en el proceso de descomposición de los contaminantes orgánicos.

Por esta razón se puede definir y utilizar la demanda biológica de oxígeno como: Un indicador de la cantidad de materia orgánica contenida en el agua y se

⁷ BRICEÑO, Nancy. *Fundamentos para el manejo de aguas residuales*. p.20.

define como concentración de oxígeno en miligramos por litro necesarios para degradar materia orgánica por medios biológicos⁸.

La medida más utilizada de este parámetro corresponde al valor de DBO indicado a los 5 días de iniciado el ensayo, realizado a una temperatura constante de 20 °C.

1.2.2.7. Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Las impurezas de origen orgánico también pueden ser degradadas con ayuda de algún químico fuertemente ácido como oxidante. Con la diferencia de que algunas sustancias inorgánicas también son oxidadas en el proceso. Sigue una lógica similar a la de utilizar la DBO como indicador ya que:

Cuantifica la cantidad de oxígeno que se necesita para degradar la materia orgánica por medios químicos y biológicos. La demanda química de oxígeno es mayor que la demanda biológica de oxígeno, ya que el DBO contempla la degradación de materia solamente por medios biológicos; y su relación determina el tiempo de tratamiento que podría darle a las aguas residuales.

1.2.2.8. Grasas y Aceites (GyA)

Son sustancias insolubles en agua, que forman películas o capas en su superficie haciendo más viscosa la mezcla⁹. Si no se eliminan antes del vertido a un cuerpo receptor pueden afectar a los organismos presentes, formando películas flotantes y dañando procesos naturales como la fotosíntesis y la respiración.

⁸ TENORIO, Rebeca. *Diseño preliminar del sistema de tratamiento de aguas residuales tipo especial de Finca 1 de la Universidad de Costa Rica, sede Rodrigo Facio*. p.19.

⁹ Ibid p.20

Se puede determinar su contenido en una muestra mediante la separación por medios físicos o mecánicos. Dependiendo de la cantidad de estas sustancias se debe dimensionar una trampa de grasa que permita separar los aceites del agua antes de enviar el agua residual al alcantarillado sanitario o sistema de tratamiento.

1.2.2.9. Sustancias activas al azul de Metileno (SAAM)

Los detergentes utilizados en actividades de limpieza tienen la particularidad de unirse a sustancias no polares y que son insolubles, razón por la cual son útiles para limpiar algunas sustancias. Debido a este comportamiento, los detergentes alteran la tensión superficial del agua (componentes tensoactivos), además de aportar nutrientes como fósforo y generar espuma en el agua.

El azul de metileno es un tinte afín a los componentes tensoactivos, de manera que puede utilizarse como un indicador de la cantidad de detergentes presentes en una muestra de agua. Su importancia reside en cuantificar estas sustancias para saber si la concentración es excesiva, y, por lo tanto, dañina para el medio ambiente.

1.2.2.10. Nitrógeno (N)

Se trata de un elemento esencial para la vida, que es aportado al agua residual principalmente mediante orina, excretas, detergentes y productos de limpieza. También, en menor medida, puede ser aportado debido a tintes, cosméticos, suplementos alimenticios, papel, entre otros.

A pesar de su utilidad para los seres vivos, se clasifica como contaminante en las aguas residuales debido a los efectos adversos que puede generar si es descargado en grandes cantidades.

AEMA indica que el Nitrógeno reduce el oxígeno disuelto de las aguas superficiales, es tóxico para el ecosistema acuático, entraña un riesgo para la salud pública y junto al fósforo (P), son responsables del crecimiento desmesurado de organismos fotosintéticos (eutrofización)¹⁰.

El nitrógeno se encuentra en las aguas residuales en cuatro formas:

- Nitrógeno amoniacal
- Nitrógeno orgánico
- Nitrógeno de nitritos
- Nitrógeno de nitratos

Por lo que en el transporte y tratamiento de las aguas se dan transformaciones entre estos compuestos, gracias a la acción de microorganismos.

1.2.2.11. Fósforo (P)

Al igual que el nitrógeno, se trata de un elemento esencial para la vida, que es aportado al agua residual principalmente mediante orina, excretas, detergentes y productos de limpieza.

¹⁰ AEMA. *Eliminación del nitrógeno en las aguas residuales*. p.1.

Se encuentra en las aguas residuales en forma de fósforo orgánico, ortofosfatos y polifosfatos. Puede generar efectos adversos si es descargado en grandes cantidades, causando eutrofización.

La proliferación súbita de algas y lirios desestabiliza un ecosistema y puede orillarlo a cambios irreversibles. Una vez que estos organismos mueren, la materia en descomposición agota los niveles de oxígeno disuelto y extermina la vida acuática. Además, las algas que proliferan en el agua pueden producir toxinas capaces de matar al ganado o mascotas que la consuman.¹¹

1.2.3. Valores típicos de contaminantes en aguas residuales domésticas

Debido al relativo parecido en las características de las aguas residuales que se generan en las actividades domésticas, la literatura relacionada a recopilado valores esperables para sus principales parámetros de calidad, la tabla III muestra valores típicos de algunos contaminantes en este tipo de aguas.

¹¹ MICROLAB INDUSTRIAL. *Las formas múltiples del Nitrógeno*. p.1.

Tabla III. **Composición típica del agua residual doméstica cruda**

Contaminantes	Unidades	Concentración		
		Débil	Media	Fuerte
Sólidos Totales (ST)	mg/L	350	720	1200
Sólidos disueltos totales (SDT)	mg/L	250	500	850
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/L	100	220	350
Sólidos sedimentables	mL/L	5	10	20
DBO _{5,20}	mg/L	110	220	400
DQO	mg/L	250	500	1000
Nitrógeno Total	mg/L	20	40	85
Orgánico	mg/L	8	15	35
Amoníaco libre	mg/L	12	25	50
Nitratos	mg/L	0	0	0
Nitritos	mg/L	0	0	0
Fósforo Total	mg/L	4	8	15
Orgánico	mg/L	1	3	5
Inorgánico	mg/L	3	5	10
Grasas	mg/L	50	100	150
Coliformes totales	n°/100 mL	10 ⁶ -10 ⁷	10 ⁷ -10 ⁸	10 ⁷ -10 ⁹

Nota: Se debe tomar en cuenta que estos valores son tomados de estudios realizados en Estados Unidos, sin embargo, provee una base de referencia respecto a los valores esperados en las aguas residuales domésticas.

Fuente: elaboración propia, adaptado de *Sistemas de tratamiento de aguas*. p.125.

1.2.4. **Valores Máximos Permisibles Según el RVRAR**

En Costa Rica, el decreto N° 33601 por parte de la presidencia de la República, el Ministerio de Salud y el Ministerio de Ambiente y Energía, titulado Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales, es el documento que regula la materia relacionada con la manera en que se dispone de las aguas residuales de cualquier edificación o establecimiento.

En este reglamento se definen parámetros de análisis obligatorio para todo tipo de aguas residuales, con sus respectivos límites máximos permitidos, este

valor máximo varía dependiendo de si la descarga se realiza a un cuerpo receptor o al alcantarillado sanitario. La tabla IV muestra la información referente a estos indicadores básicos.

Tabla IV. **Límites de parámetros de muestreo obligatorio según RVRAR**

Parámetro	Unidad	Límite máximo, alcantarillado sanitario	Límite máximo, cuerpo receptor
DBO	mg/L	300	50
DQO _{5,20}	mg/L	750	150
Sólidos suspendidos	mg/L	300	50
Sólidos sedimentables	ml/L	5	1
Grasas y aceites	mg/L	50	30
Potencial de hidrógeno	de unidades de pH	6 a 9	5 a 9
Temperatura	°C	15 a 40	15 a 40
SAAM	mg/L	5	5

Fuente: MINAE y MINSA. *DE-No 33601: Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales*. p.15.

1.3. Tratamiento de aguas residuales

El tratamiento del agua consiste en la aplicación de procesos determinados para mejorar las características físicas, químicas y biológicas de la misma, de manera que se eviten perjuicios contra el medio ambiente y la salud humana. Estos procesos se pueden clasificar en tres grandes grupos.

1.3.1. Procesos que intervienen

Se mencionan, a continuación, los tres principales tipos de procesos que permiten que se realice la remoción de contaminantes en las unidades que se diseñan para la depuración de aguas residuales.

Se trata de los procesos físicos, químicos y biológicos, los cuales son utilizados en combinación para obtener los resultados deseados.

1.3.1.1. Procesos físicos

Consisten en aplicar cambios físicos al agua, de manera que se separan componentes, pero no se altera la composición de ninguna sustancia. Se pueden utilizar herramientas como rejillas o las propiedades de los fluidos como en el caso de desarenadores. Suelen ser los primeros procesos en aplicarse durante un tren de tratamiento.

1.3.1.2. Procesos químicos

Se utilizan sustancias químicas que se adicionan al agua, y estas a su vez reaccionan con los contaminantes que se encuentran en el líquido, de manera que se hace más fácil su separación posterior por medios físicos (como sucede en la floculación), o bien, se alteran propiedades del agua, como por ejemplo el pH, mediante la adición de un ácido o una base. En algunas ocasiones la adición de sustancias químicas se realiza con el fin de mejorar procesos físicos o biológicos.

1.3.1.3. Procesos biológicos

Se utiliza la acción de microorganismos que remueven materia orgánica y patógenos del agua, son ampliamente utilizados en el tratamiento de aguas residuales, en especial si se tiene un gran porcentaje de contaminación de origen orgánico. La clave de estos sistemas es mantener un ambiente ideal para el crecimiento, desarrollo y renovación de los microorganismos. Para que se pueda llevar a cabo un tratamiento de este tipo debe existir:

- **Materia orgánica:** es el alimento que es asimilado por los microorganismos para llevar a cabo sus funciones vitales, por lo que, de no existir, los organismos mueren.
- **Microorganismos:** son los responsables de la mayor parte de la depuración del agua en los procesos de tipo biológico, por lo que es vital que existan los microorganismos adecuados según las condiciones que se presentan (aerobias, anaerobias).
- **Nutrientes:** para poder realizar el ciclo microbiano, se requiere de al menos Nitrógeno, Carbono, Hidrógeno y otros elementos vitales para la formación de las nuevas células.
- **Compuestos aceptores de electrones:** para realizar su respiración, las células requerirán oxígeno u otro aceptor de electrones como nitratos, sulfatos o dióxido de carbono.

Estos procesos requieren tiempo para su estabilización y son propensos a perder su equilibrio biológico debido a agentes externos o cambios en las condiciones.

1.3.2. Plantas de tratamiento de aguas residuales

A la combinación planificada de diferentes operaciones unitarias que realizan procesos de tratamiento físicos, químicos o biológicos, para obtener los resultados de calidad deseados en el efluente, se la llama planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR).

En términos generales, una PTAR de aguas residuales domésticas seguirá el siguiente orden establecido para remover los diferentes contaminantes presentes en el líquido:

- Sólidos gruesos
- Arenas y residuos sólidos de menor tamaño
- Grasas y aceites
- Materia orgánica sedimentable
- Materias orgánica disuelta y coloidal
- Nutrientes (principalmente fósforo y nitrógeno)
- Organismos patógenos

Siguiendo este orden lógico de remoción de contaminantes, se han clasificado los procesos de depuración en cuatro grupos, tal como se aprecia en el esquema de la figura 2.

Figura 2. **Esquema de procesos de tratamiento en una PTAR**



Fuente: CENTENO, Erick. *Manual Operativo de Lagunas Aireadas*. p.12.

Esta clasificación típica de los procesos de tratamiento en una PTAR es explicada por Briceño:

- Pretratamiento: etapa donde se separan los sólidos gruesos, arenas, grasas y aceites, se utilizan tamices, rejas, desarenadores y trampas de grasa.
- Tratamiento primario: tiene por objetivo el tratamiento de la materia sedimentable y una fracción de la materia orgánica, las unidades más aplicadas son los sedimentadores.
- Tratamiento secundario: se encarga del tratamiento de la materia orgánica disuelta, coloidal y, en algunos casos, nutrientes; en esta etapa se cuenta con una amplia gama de procesos como lodos activados, reactores anaerobios, sistemas lagunares y otras tecnologías.
- Tratamiento terciario: se utiliza para eliminar o disminuir la concentración de compuestos o elementos específicos, así como microorganismos patógenos; en el caso del tratamiento de patógenos, uno de los procesos más utilizados, es el tratamiento químico mediante la adición de compuestos desinfectantes como el hipoclorito de sodio o el hipoclorito de calcio, entre otros; también se pueden aplicar procesos de filtración.¹²

1.3.3. Sistemas de tratamiento de aguas residuales para zonas rurales

Las comunidades rurales se enfrentan a una variedad de condiciones socioeconómicas y territoriales que hacen que sea más difícil construir sistemas de saneamiento de aguas residuales modernos y sofisticados. Entre las limitaciones que generan esta dificultad se pueden mencionar:

- Restricciones de descarga impuestas en la legislación
- Altos costos operativos per cápita, en especial en poblaciones pequeñas

¹² BRICEÑO, Nancy. *Fundamentos para el manejo de aguas residuales*. p.12.

- Falta de acceso financiamiento
- Presupuesto de mantenimiento limitado
- Aspectos educativos, culturales y sociales

Los habitantes de zonas rurales y comunidades marginales suelen tener un nivel socioeconómico bajo, por lo que una tecnología apropiada para el tratamiento de aguas residuales en este medio es aquella que logre una remoción de contaminantes que cumpla con los límites de vertido o reúso de la legislación del país, mediante un proceso sencillo, con baja dependencia tecnológica y con bajos costos de operación y mantenimiento, incluso al ser aplicados en poblaciones pequeñas.

1.3.3.1. Sistemas de tratamiento individuales o descentralizados

Tratan el agua residual que se genera en un único terreno, que puede incluir una vivienda, un condominio, un edificio industrial, entre otros. No son exclusivos de zonas rurales, pero su utilización es amplia en dichas regiones, en especial debido a la dispersión de las viviendas, la disponibilidad de espacio en cada terreno y la falta de infraestructura de alcantarillado.

La tecnología más utilizada para tratamiento individual de agua residual doméstica en Latinoamérica es la de tanques sépticos. Por lo general, el efluente de estos sistemas es infiltrado al suelo mediante zanjas o pozos de absorción. Según Sperling, los porcentajes de remoción esperados para un sistema de tratamiento individual compuesto por un tanque séptico seguido de un proceso de infiltración al terreno son:

- DBO_{5,20}: 90-98 %

- DQO: 85-95 %
- SS: mayor a 93 %¹³

Esto indica que se trata de sistemas adecuados y que su utilización es una alternativa viable para comunidades rurales. Sin embargo, hay situaciones en las que la superficialidad del nivel freático, la baja permeabilidad del suelo, la alta densidad poblacional, la amenaza de contaminación de acuíferos, u otras razones de peso, hacen necesaria la implementación de sistemas colectivos de tratamiento en zonas rurales.

1.3.3.2. Sistemas de tratamiento colectivos o centralizados

Este tipo de sistemas requieren la recolección y transporte de las aguas residuales generadas mediante un sistema de alcantarillado, el cual lleva el caudal a la PTAR para su tratamiento y disposición o reúso.

El tren de pretratamiento y de tratamiento primario de PTARs para zonas rurales suele ser similar al de plantas convencionales, con la diferencia de que todas las actividades de operación y mantenimiento se realizan de forma manual. Es en el tratamiento secundario, principalmente, donde se encuentran las mayores diferencias tecnológicas en los sistemas que son ideados para comunidades rurales.

Tradicionalmente se han aceptado los sistemas de tratamiento extensivos (también llamados métodos naturales) como apropiados para comunidades rurales, lo cual incluye principalmente sistemas lagunares, humedales artificiales,

¹³ VON SPERLING, Marcos. *Wastewater characteristics, treatment and disposal*. p. 353.

filtros de turbas y arena¹⁴. Estos sistemas pueden ofrecer excelentes resultados, con el inconveniente de que requieren un área varias veces mayor que otros sistemas para su aplicación.

1.3.4. Uso de Suelo en sistemas de tratamiento de aguas

Las particularidades del suelo lo hacen un material sumamente apto para la remoción de contaminantes del agua, el mejor ejemplo de este proceso es la purificación que se realiza de manera natural en las aguas que se infiltran a través del suelo, lo cual recarga los acuíferos en capas inferiores.

La composición del suelo es sumamente heterogénea y compleja, con partículas orgánicas e inorgánicas, tamaños, formas y texturas distintas, en su distribución se puede valorar también la existencia de vacíos entre las partículas. Entre los principales compuestos del suelo que ayudan en el tratamiento de aguas residuales se pueden mencionar:

- Minerales de arcilla de silicato
- Óxidos hidratados de hierro, aluminio y manganeso
- Carbonatos de magnesio y calcio
- Materia orgánica
- Bacterias, hongos y protozoos

El suelo tiene capacidad de tratar materia orgánica e inorgánica, al igual que organismos patógenos, pues actúa como filtro, como intercambiador iónico, como

¹⁴ SÁNCHEZ, Belén. *Procesos extensivos, depuración natural al alcance de todos: Tipos, ventajas e inconvenientes*. p.1.

adsorbedor y como superficie sobre la cual pueden ocurrir muchos procesos químicos y bioquímicos.¹⁵

Romero también indica que los suelos suelen estar compuestos mayoritariamente por partículas cargadas negativamente, por lo que pueden atraer y remover compuestos catiónicos con facilidad, además se pueden dar en ellos procesos físicos de filtración cuando no se encuentra saturado. El suelo también es capaz de remover bacterias, virus, amonio, nitrógeno y fósforo.¹⁶

Loomis contrasta el tratamiento que ocurre en un agua residual que se filtra en un medio arcilloso poco permeable con el que sucede en un suelo permeable compuesto por partículas más gruesas. En el primer tipo de tratamiento ocurren condiciones de estancamiento, favoreciendo ambiente anaeróbico y poco tratamiento; mientras que, en el segundo caso, se tiene un periodo de retención bajo y menor depuración. Esto lo lleva a concluir que el tratamiento ideal podría darse promoviendo el flujo no saturado a través de un suelo con la mayor área superficial posible, lo cual balancea el tiempo de retención y las condiciones de flujo.¹⁷

1.4. Sistema de filtración en bloques de suelo o *Multi Soil Layering* (MSL)

En esta sección se describe el sistema MSL, incluyendo aspectos de su composición, materiales, funcionamiento, construcción y desempeño.

¹⁵ ROMERO, Jairo. *Tratamiento de aguas residuales: Teoría y principios de diseño*. p.725.

¹⁶ *Ibíd.* p.726.

¹⁷ LOOMIS, George. *Soil Based Wastewater Treatment*. p.3.

1.4.1. Descripción del sistema

La filtración en bloques de suelo (MSL por sus siglas en inglés) es un tipo de sistema de tratamiento secundario de aguas residuales diseñado principalmente para ser utilizado en zonas rurales, su utilización se ha investigado desde el año 1990, principalmente en países asiáticos.

Algunas características del sistema son:

- Ofrece altos porcentajes de remoción para contaminantes orgánicos, sólidos suspendidos, nitrógeno, fósforo, entre otros.
- Tiene capacidad limitada para reducir patógenos, removiendo, en promedio, apenas una unidad logarítmica de E. Coli. Sin embargo, experimentos con dos sistemas MSL en serie han obtenido remoción de patógenos de hasta 3 unidades logarítmicas.¹⁸
- Se puede construir con materiales locales y desechos de otras industrias.
- No requiere de equipo especializado para su construcción ni operación.
- No requiere energía eléctrica.
- Su construcción y operación son de bajo costo.
- Bajo requerimiento de área en comparación con otros sistemas recomendados para zonas rurales (como lagunas y humedales).
- Puede ser construido enterrado o sobre el nivel del suelo.
- Su operación es sencilla, por lo que no requiere personal especializado.
- Se ha comprobado que su vida útil es de entre 15 y 20 años.¹⁹

¹⁸ LATRACH *et al.* *Optimization of hydraulic efficiency and wastewater treatment performances using a new design of vertical flow Multi-Soil-Layering (MSL) technology.* p.142.

¹⁹ SATO *et al.* *Quantitative evaluation of treatment processes and mechanisms of organic matter, phosphorus, and nitrogen removal in a multi-soil-layering system.* p.476.

- Una vez terminada la vida útil del sistema, se puede utilizar los materiales del sistema como mejoradores de suelo para agricultura, ya que cuentan con una gran cantidad de nutrientes y materia orgánica.

1.4.1.1. Principios básicos

El sistema MSL se basa en la experiencia de que el suelo cuenta con propiedades favorables para realizar el tratamiento de aguas residuales, ya que es un material complejo en el que se dan procesos físicos, químicos y biológicos.

El principal problema de utilizar suelo para el tratamiento de aguas es la colmatación del medio, los poros del material se obstruyen al poco tiempo de ser utilizado como filtro, y realizar limpiezas o retro lavados se vuelve caro y complicado debido a las características del suelo y los sistemas.²⁰

Es por esto por lo que el sistema MSL busca utilizar la filtración en suelo, pero evitando la colmatación y agregando algunos componentes que mejoran las características del efluente.

1.4.1.2. Disposición

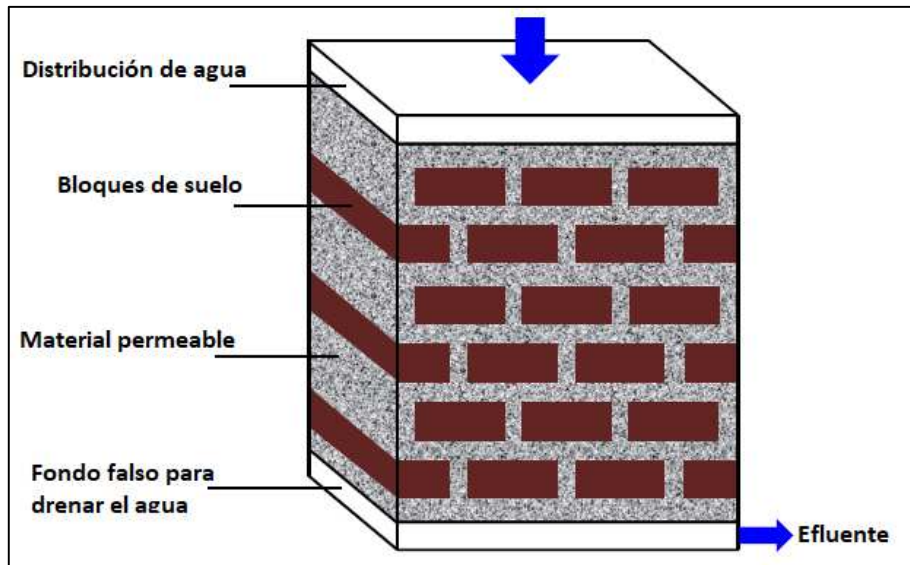
La figura 3 muestra un esquema típico de un sistema MSL, el cual consiste en un arreglo similar al de unos ladrillos, con bloques de suelo intercalados y material permeable en medio de ellos.

El agua ingresa por la parte superior, de manera que se distribuya lo más uniformemente posible, pasa a través de las capas de material permeable y

²⁰ MASUNAGA *et al.* *Characteristics of wastewater treatment using a multi-soil-layering system in relation to wastewater contamination levels and hydraulic loading rates.* p.215.

bloques de suelo. Finalmente, el agua tratada es recogida por un sistema de drenaje interno.

Figura 3. Esquema típico de un sistema MSL



Fuente: elaboración propia, adaptado de *Systems for Wastewater Treatment in Small and Remote Communities*. p.133.

1.4.2. Dimensiones

Las investigaciones realizadas hasta la fecha en distintos países han variado las dimensiones del sistema MSL, e incluso se han probado unidades de sección rectangular y circular. En el Anexo 1 se aprecia una recopilación de información realizada por An *et al.*, de esta se desprende que las dimensiones de estos sistemas han variado entre los 32 x 16 x 60 cm hasta los 350 x 250 x 150 cm, refiriéndose a largo, ancho y altura, respectivamente²¹.

²¹ AN *et al.* *Multi-Soil-Layering Systems for Wastewater Treatment in Small and Remote Communities*. p.136.

Las dimensiones de los bloques de suelo, distancia entre bloques y espesor de las capas permeables también han variado entre experimentos, con valores comprendidos entre los siguientes intervalos:

- Espesor de las capas horizontales de material permeable entre capas de bloques de suelo: 2 hasta 10 cm.
- Ancho de los espacios horizontales entre bloques de suelo en una misma capa: 0 hasta 20 cm.
- Dimensiones de los bloques de suelo: 9 x 10 x 3.6 hasta 60 x 100 x 10 cm, refiriéndose a largo, ancho y altura, respectivamente.

1.4.3. Materiales

An et al. también recopilan los materiales utilizados en investigaciones previas de sistemas MSL (ver anexo 1). Se menciona a continuación la composición de los bloques de suelo y capas permeables utilizadas en diferentes investigaciones previas²².

1.4.3.1. Bloques de suelo

Los bloques son elaborados con una mezcla de suelo y otros materiales, cuyos porcentajes se dosifican utilizando su peso seco, estos después se confinan con la ayuda de bolsas o sacos de un material permeable y preferiblemente biodegradable, entre los materiales utilizados se encuentran:

- Suelo (desde 50 hasta 75 % de la mezcla)
 - Suelo arenoso
 - Suelo arcilloso

²² AN et al. *Multi-Soil-Layering Systems for Wastewater Treatment in Small and Remote Communities*. p.136.

- Arcilla arenosa
- Andisoles
- Entisoles
- Carbón (desde 0 hasta 10 % de la mezcla)
 - Carbón de árboles locales
 - Carbón activado en polvo
- Hierro (desde 10 hasta 15 % de la mezcla)
 - Trozos de hierro de desecho de 1 mm
 - Trozos de hierro de desecho de hasta 2 cm
 - Hierro granular
- Materia orgánica (desde 5 hasta 30 % de la mezcla)
 - Aserrín
 - Desperdicios de kenaf
 - Corazón de la mazorca de maíz triturado
 - Granza de arroz
 - Yute comprimido
 - “Basura” del suelo del bosque
- Bolsas
 - Yute
 - Gangoche

1.4.3.2. Capas permeables

Para las capas permeables se ha hecho frecuente el uso de zeolita, sin embargo, también se ha experimentado con otros materiales:

- Zeolita
- Zeolita (95 %) y trozos de hierro (5 %)
- Perlita

- Grava
- Arcilla expandida
- Carbón activado granular
- Conchas marinas trituradas

1.4.4. Aireación

Algunos investigadores han incorporado tubos de aireación a sus sistemas MSL con el fin de evaluar el efecto que dicho proceso tiene sobre la depuración del agua residual y los problemas de colmatación.

El ingreso de aire en la cantidad adecuada y con la frecuencia correcta puede mejorar la remoción de DBO, DQO, nitrógeno y fósforo totales, lo cual se hace particularmente importante durante los meses fríos de países con clima templado.

Para el caso de climas más tropicales, una tasa de aireación de 20 000 L/m³/día durante 3 días, seguidos de dos meses sin aireación, ha demostrado ser apropiado para la operación de sistemas MSL de agua residual doméstica, según estudios realizados en Tailandia²³.

Song *et al.* también han indicado que el uso de aireadores externos para sistemas MSL favorece la oxigenación y ese flujo de aire reduce la posibilidad de colmatación²⁴.

²³ LUANMANEE *et al.* *Treatment of domestic wastewater with a Multi-Soil-Layering System in a temperate and tropical climate. Extension Bulletin, Food and Fertilizer Technology Center.* p.4.

²⁴ SONG *et al.* *Treatment of rural domestic wastewater using multi-soil-layering systems: Performance evaluation, factorial analysis and numerical modeling.* p.539.

1.4.5. Procesos que se llevan a cabo en el sistema

En los sistemas MSL se presenta una combinación compleja de factores que permite la remoción de distintos contaminantes, entre los procesos que se desarrollan se encuentran la precipitación, filtración, adsorción y biodegradación²⁵.

Así mismo, An *et al.* indican que con el paso del agua residual y los contaminantes que contiene, la matriz de suelo en los bloques permite procesos como adsorción de partículas, intercambio iónico, oxidación reducción, migración y precipitación, consumo por parte de animales y plantas, entre otros²⁶.

Las características únicas de permeabilidad, estructura y distribución del agua en sistemas MSL hace posible que los bloques de suelo operen como zonas saturadas anaeróbicas y las capas permeables operen como zonas aeróbicas, esto permite que se dé una gran variedad de procesos dentro del sistema.

Los componentes que se utilizan para construir un filtro en bloques de suelo ejercen distintas funciones durante la depuración, tal como se resume en la tabla V. Adicionalmente, se muestra en la figura 4 un esquema de los principales mecanismos que ocurren en un sistema MSL.

²⁵ LAMZOURI *et al.* *Application of Multi-soil-layering technique for wastewater treatment in Moroccan rural areas: study of the operation process for an engineering design.* p.580.

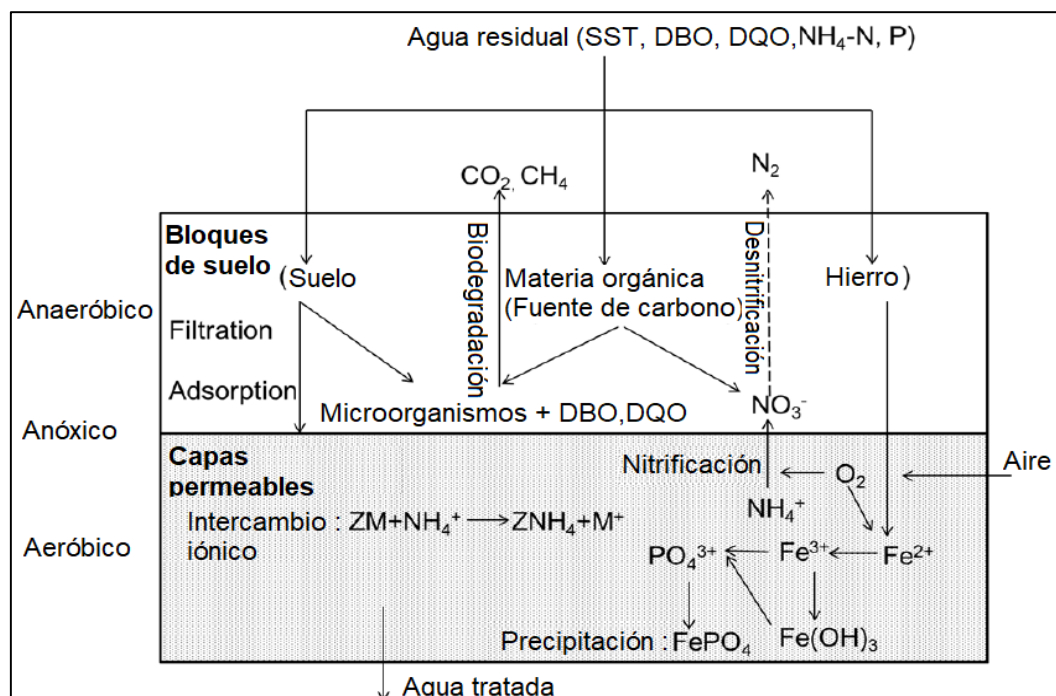
²⁶ AN *et al.* *Multi-Soil-Layering Systems for Wastewater Treatment in Small and Remote Communities.* p.132

Tabla V. **Componentes y sus funciones en un sistema MSL**

Componente	Función	Mecanismo
Suelo	Proveer microorganismos y volumen de poros	Funciona como filtro y como hábitat para microorganismos
Hierro	Incrementa la capacidad de adsorción de fosfatos	La capacidad de adsorción de fosfatos de un suelo está relacionada con su contenido de Hierro y Aluminio activos
Yute, aserrín	Aumentan la actividad microbiana y proveen hidrógeno durante el proceso de desnitrificación	La eficiencia de remoción de nitrógeno de un sistema MSL puede ser limitado si la cantidad de carbón orgánico es insuficiente
Carbón activado	Provee carbono para los procesos y mejora la capacidad de descomposición biológica y de adsorción del sistema	El carbón activado tiene un área superficial y capacidad de adsorción considerables

Fuente: elaboración propia, adaptado de *Systems for Wastewater Treatment in Small and Remote Communities* p.133.

Figura 4. **Mecanismos en un sistema MSL**



Fuente: elaboración propia, adaptado de *Systems for Wastewater Treatment in Small and Remote Communities* p.133.

Sato et al. detallan los procesos específicos que remueven materia orgánica, nitrógeno y fósforo. También indican en qué parte del sistema se llevan a cabo mayoritariamente dichas remociones²⁷.

1.4.5.1. Remoción de materia orgánica

La materia orgánica incluye gran parte de los sólidos suspendidos del agua residual de origen doméstico, y es eliminada del agua residual debido a las siguientes razones:

- Es removida mediante filtración, principalmente en los bloques de suelo.
- Los contaminantes pequeños pueden aglutinarse con coloides del suelo y posteriormente quedar retenidos.
- Los contaminantes solubles pueden ser adsorbidos por partículas de suelo.
- Los contaminantes orgánicos retenidos en los bloques de suelo y capas permeables son digeridos por microorganismos, para lo cual el yute, carbón activado y aserrín pueden proveer carbono.
- La remoción de materia orgánica sucede principalmente en las capas superiores del sistema.

1.4.5.2. Remoción de Nitrógeno

En primer lugar, organismos nitrificadores ubicados principalmente en las capas permeables (zonas aeróbicas) convierten el nitrógeno amoniacal en nitritos, que posteriormente se oxidan para dar lugar a nitratos.

²⁷ SATO et al. *Quantitative evaluation of treatment processes and mechanisms of organic matter, phosphorus, and nitrogen removal in a multi-soil-layering system.* p.478-480.

Posteriormente, microorganismos ubicados en los bloques de suelo, (zonas anaeróbicas), transforman los nitratos en nitrógeno gaseoso, siempre y cuando cuenten con suficiente carbono disponible.

De esta manera, el nitrógeno amoniacal es eliminado del agua residual mediante procesos de nitrificación y desnitrificación en el sistema MSL, conforme el agua pasa por capas permeables y capas de bloques de suelo. La mayoría de la nitrificación se da en las capas superiores del sistema, mientras que la desnitrificación ocurre mayoritariamente en las capas inferiores.

Adicionalmente, algunos tipos de suelo y materiales permeables como la zeolita cuentan con una alta capacidad de intercambio de cationes, lo cual hace posible que exista adsorción de iones de amonio.

1.4.5.3. Remoción de Fósforo

Las partículas de hierro que se ubican en los bloques de suelo son disueltas y arrastradas hasta las capas permeables, esto permite que Fe se oxide en Fe (III) y forme hidróxidos de Fe (III). Los fosfatos presentes en el agua residual pueden unirse con los hidróxidos de hierro o formar precipitados con iones de hierro, los cuales son filtrados o adsorbidos en otras capas del sistema.

Adicionalmente, el fósforo puede ser adsorbido por los hidróxidos de aluminio presentes en el suelo, siguiendo un proceso similar al descrito para los hidróxidos de hierro.

1.4.6. Carga hidráulica y remoción esperada

An *et al.* realizaron una recopilación de numerosos experimentos realizados con distintas tasas de carga hidráulica superficial (ver anexo 2), de ahí se desprende que:²⁸

- Se han realizado pruebas con cargas hidráulicas superficiales que van desde los 200 hasta los 4000 L/m² día.
- En términos generales, se aprecia mayores porcentajes de remoción para cargas hidráulicas menores a 600 L/m² día.
- Porcentajes de remoción para DBO: desde 52.6 hasta 99.8 %.
- Porcentajes de remoción para DQO: desde 22.9 hasta 98.1 %.
- Porcentajes de remoción para sólidos suspendidos totales: desde 32.4 hasta 97.2 %.
- Porcentajes de remoción para Nitrógeno total: desde 22 hasta 99.7 %.
- Porcentajes de remoción para Fósforo total: desde 26.1 hasta 99.1 %.

1.4.7. Selección del tratamiento previo

Debido a que la filtración en bloques de suelo es un tipo de tratamiento secundario para aguas residuales, se requiere la utilización de un tren de pretratamiento y una operación unitaria de tratamiento primario antes de ingresar el agua residual al sistema MSL.

En la experimentación realizada hasta el momento predomina el uso de tanques sépticos como tratamiento primario previo a la filtración en bloques de suelo, aunque también se ha observado el uso satisfactorio de tanques de sedimentación primaria.

28 AN *et al.* *Multi-Soil-Layering Systems for Wastewater Treatment in Small and Remote Communities*. p.138.

Sin embargo, es probable que otras unidades de tratamiento primario sean aptas para ser utilizadas como proceso previo a un sistema MSL. Algunos ejemplos de estas unidades son los Reactores Anaerobios de Flujo Ascendente y los Tanques Imhoff.

Los valores extremos en parámetros de calidad del agua residual de entrada para sistemas MSL fueron observados en las publicaciones de Masunaga *et al.*²⁹ y Deshpande *et al.*³⁰:

- DBO: desde 32 hasta 378 mg/L
- DQO: desde 43 hasta 504 mg/L
- SST: desde 27 hasta 842 mg/L

²⁹ MASUNAGA *et al.* *Characteristics of wastewater treatment using a multi-soil-layering system in relation to wastewater contamination levels and hydraulic loading rates.* p.219.

³⁰ DESHPANDE *et al.* *Experimental Investigation of Treatment of Domestic Wastewater Using Multi Soil Layering (MSL) System.* p.6.

2. METODOLOGÍA

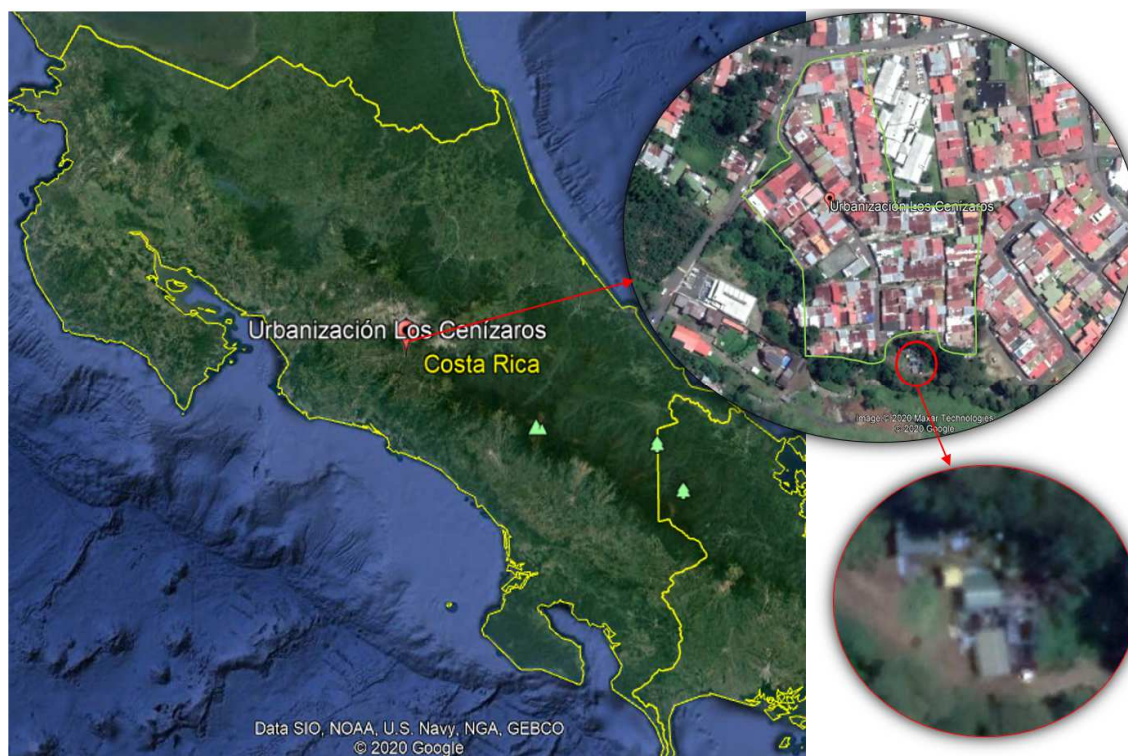
En el presente estudio, la evaluación del desempeño técnico del sistema MSL se realizó mediante la construcción, operación y muestreo de 4 pilotos instalados en la planta de tratamiento de una comunidad. Por otro lado, la evaluación económica se llevó a cabo mediante el presupuesto de las obras y los costos estimados de operación y mantenimiento para una comunidad de 100 viviendas.

2.1. Localización

El proyecto se realiza en la PTAR de la Urbanización Los Cenízaros, ubicada en Barrio Corazón de Jesús. Este sitio pertenece al distrito de Aserrí, cantón de Aserrí, de la provincia de San José, justo en las afueras de la Gran Área Metropolitana. La zona se puede clasificar como urbana, y se ubica a 600 metros al noreste del parque de Aserrí centro. Esta urbanización es un proyecto de bien social construido en los años 90 y cuenta con 150 casas, no hay lotes desocupados.

En la figura 5 se aprecian fotografías satelitales con la ubicación de la urbanización marcada con una línea verde y la PTAR encerrada en un círculo rojo.

Figura 5. **Fotografía satelital de la ubicación del proyecto**



Fuente: elaboración propia, adaptado de Google Earth,2020. Consultado el 6 de noviembre de 2020.

2.1.1. Características socioeconómicas de la población

La población que es atendida por la PTAR corresponde con los habitantes de la Urbanización Los Cenizáros, en la cual habitan aproximadamente 700 personas de bajo ingreso económico. La comunidad se encuentra en una zona de fácil acceso, a unos 30 minutos de la capital, con vías de tránsito asfaltadas, acceso a servicio de electricidad y agua potable intradomiciliaria.

Según información del INEC, se tienen las siguientes características aproximadas para la población de este sector³¹:

- Estadísticas demográficas:
 - Porcentaje de población urbana: 100 %
 - Relación hombres-mujeres: 93.6 hombres por cada 100 mujeres
 - Relación de dependencia demográfica: 43.7 %
 - Porcentaje de población de 65 años o más: 5.9 %
- Estadísticas educación
 - Escolaridad promedio de la población de 15 años o más: 8.8 años
 - Porcentaje de la población analfabeta: 1.5 %
- Estadísticas sociales
 - Porcentaje de personas unidas o casadas: 49.1 %
 - Porcentaje de personas con discapacidad: 11.4 %
 - Porcentaje de población no asegurada: 13.2 %
 - Porcentaje de hogares con jefatura femenina sin cónyuge: 25.8 %
 - Porcentaje de hogares con jefatura masculina sin cónyuge: 7.6 %
 - Porcentaje de hogares nucleares: 68.2 %
 - Porcentaje de hogares extensos: 20.5 %
- Estadísticas económicas
 - Tasa de ocupación: 54.6 %
 - Tasa de desempleo abierto: 3.4 %
 - Porcentaje de la población empleadora: 5.8 %
 - Porcentaje de la población cuenta propia: 17.9 %
 - Porcentaje de la población asalariada: 75.8 %
 - Ingreso promedio por hogar: 253 643 colones (415 dólares)

³¹ INEC. X Censo Nacional de Población, Año 2011.

2.1.2. Características de la PTAR

El sistema de tratamiento de aguas residuales de la urbanización los Cenízaros es una obra civil que data de la década de los años 90 y corresponde a un sistema anaeróbico que recibe el efluente de una población cercana a las 700 personas. Inicialmente, el sistema se componía de las siguientes unidades:

- Canal de rejas para separación de sólidos gruesos.
- Desarenador.
- Trampa de flotantes o desengrasador.
- Dos estructuras de plástico para el secado de los sólidos remanentes de las unidades de pretratamiento.
- Reactor anaerobio de flujo ascendente (RAFA, o UASB por sus siglas en inglés).
- 3 “filtros” con grava y arena.
- Digestor de lodos.
- Lechos de secado.

Los 3 filtros de grava indicados se sacaron de operación, esto debido a que no funcionaban adecuadamente y carecían de sustento técnico de diseño. La planta ha seguido operando mediante el RAFA existente, pero este proceso por sí solo no es suficiente para llevar el agua residual a la calidad exigida por el Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales.

Se utilizó el efluente del RAFA para desviar un porcentaje del caudal y alimentar a los pilotos de MSL, los cuales funcionan como tratamiento secundario para la porción de agua desviada. Se muestra en la figura 6 una vista general de las instalaciones, y en la figura 7 un esquema del funcionamiento de la PTAR con los pilotos instalados.

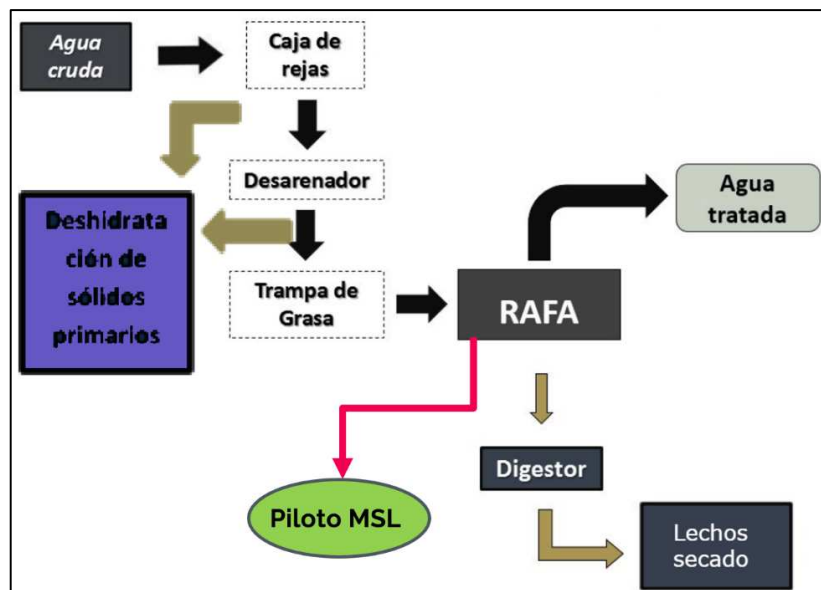
Cabe resaltar que actualmente la PTAR no se encuentra operando en condiciones óptimas, ya que tiene múltiples daños en sus sistemas y no recibe las purgas periódicas en el RAFA, ni la operación diaria correspondiente.

Figura 6. **Fotografía de vista general de la PTAR Los Cenízaros**



Fuente: PTAR Urbanización Los Cenízaros, Aserrí.

Figura 7. **Esquema de funcionamiento de la PTAR Los Cenízaros**



Fuente: elaboración propia.

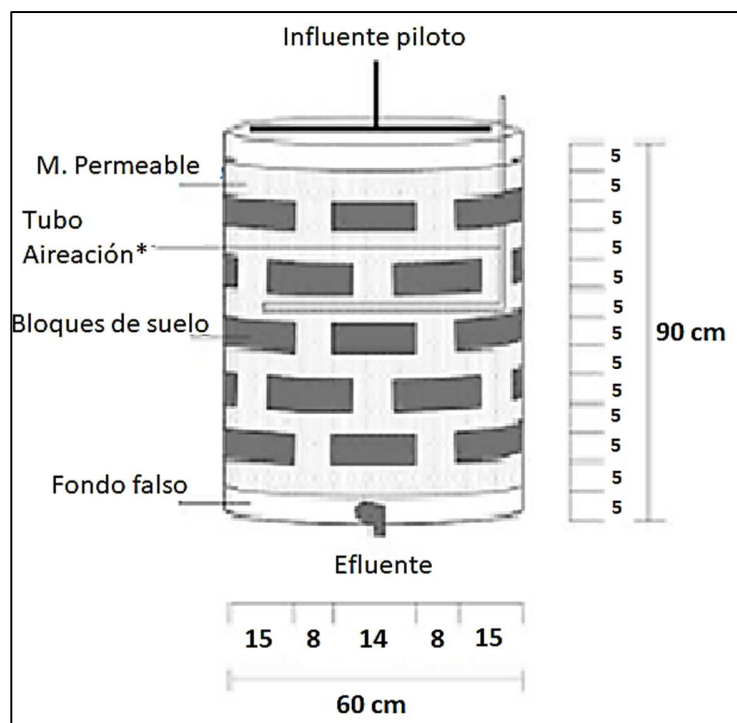
2.2. Sistemas piloto

En esta sección se indican las características y la manera en que se construyeron los pilotos que permitieron evaluar el funcionamiento del sistema MSL.

2.2.1. Descripción

De acuerdo con los recursos disponibles y la intención de probar varias configuraciones del sistema MSL, se construyen 4 pilotos distintos. Cada uno corresponde a un estañón de polietileno relleno de manera alternada con capas de 5 cm de altura de material permeable y de bloques de suelo. En la figura 8 se muestra un esquema inicial de un piloto MSL.

Figura 8. Esquema ilustrativo de piloto MSL



Fuente: elaboración propia.

2.2.2. Componentes

Cada piloto cuenta con un confinamiento, material permeable, bloques de suelo, entre otras estructuras para la distribución y recolección del agua.

2.2.2.1. Estañones

Se decide utilizar estañones para confinar la estructura MSL, por lo que se consiguen 4 recipientes de polietileno con medidas aproximadas de 60 cm de diámetro y 90 cm de altura, para un volumen total efectivo de 210 L.

Se instala un grifo en la parte baja de cada uno de los estañones, con el fin de que el efluente tratado salga por el fondo. Adicionalmente, para evitar acumulación de agua, se construye una capa de concreto hasta el nivel del grifo. Se muestran los estañones utilizados en la figura 9.

Figura 9. **Estañón utilizado para los pilotos**



Fuente: Recipientes Durán. *Productos*. <https://recipientesduran.yolasite.com>. Consulta: 24 de enero de 2021.

2.2.2.2. Fondo falso

El fondo falso de los pilotos se logra colocando una capa de 5 cm de altura de piedra cuarta, con un tamaño característico de 38 mm, esto permite que el agua que llega hasta el fondo fluya libremente. Posteriormente se agrega piedra quintilla (12.5 mm) para rellenar los espacios y permitir una base que retenga el material permeable de las capas del sistema MSL.

Figura 10. **Fotografía de fondo falso en los pilotos**



Fuente: bodega de tanques de almacenamiento del AyA, Curridabat.

2.2.2.3. Bloques de suelo

Los bloques de suelo están compuestos por material mezclado y confinado dentro de bolsas de yute. Los materiales se dosifican según su peso seco con la siguiente proporción:

- 70 % suelo
- 10 % aserrín
- 10 % trozos de hierro
- 10 % carbón activado en polvo

Las bolsas de yute (ver figura 11) se hacen a la medida, en dos tamaños distintos, de manera que al llenarse con el material mezclado alcanzan las dimensiones deseadas:

- Bolsas grandes: 15 cm de ancho, 5 cm de altura, longitud variable.
- Bolsas pequeñas: 7 cm de ancho, 5 cm de altura, longitud variable.

Figura 11. **Fotografía de bloques de suelo utilizados en los pilotos**



Nota: bolsas de yute abiertas y rellenas con el material mezclado (izquierda) y bolsas de yute rellenas y cerradas (derecha).

Fuente: Urbanización Los Cenízaros, Aserrí.

Se utilizan dos tipos de mezcla para la investigación, una de ellas con un suelo arenoso y la otra con un suelo limoso. El aserrín, carbón activado y hierro es igual para ambos tipos de mezcla y las proporciones se mantienen para los dos casos.

2.2.2.4. Material permeable

Se utilizan dos tipos de material permeable en la elaboración de los pilotos, según el rango recomendado de tamaño para sistemas MSL, según se puede observar en la figura 12:

- Antracita con tamaño característico de 1 mm.
- Piedra de cantera con tamaño característico entre 3 y 6 mm.

Figura 12. **Fotografías del material permeable utilizado en los pilotos**



Fuente: Urbanización Los Cenízaros, Aserrí.

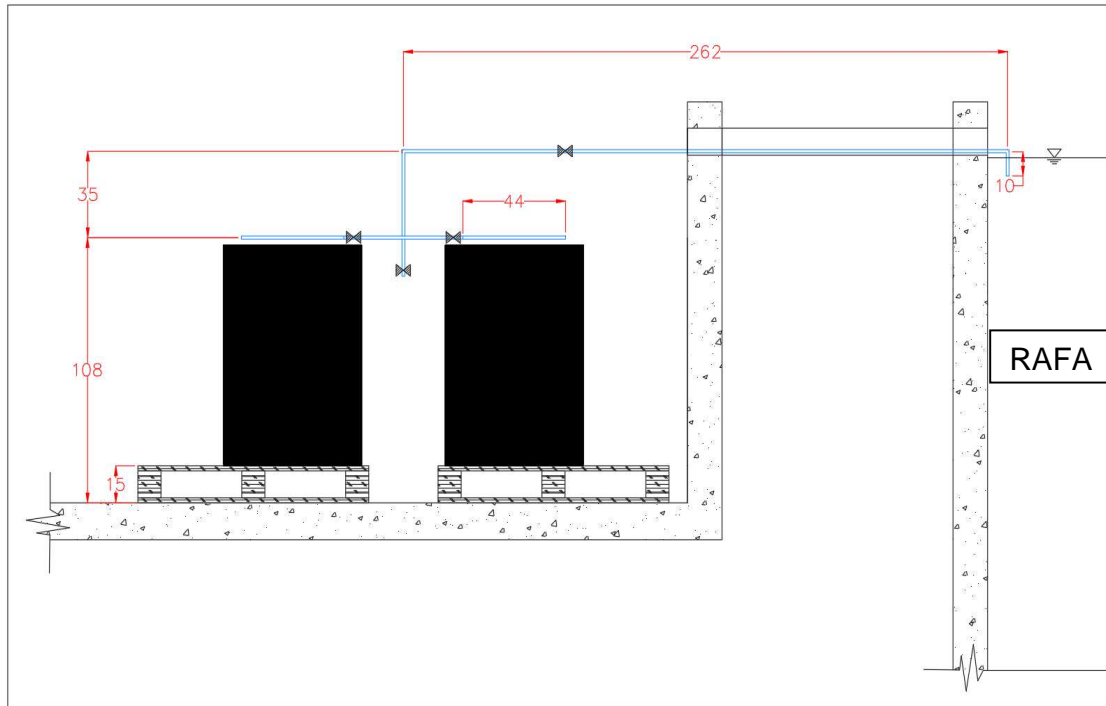
2.2.2.5. Sistema para distribución de caudal

El caudal necesario es tomado desde el RAFA de la PTAR utilizando una tubería de PVC de 1/2 pulgada de diámetro y un sifón invertido, posteriormente, se divide en 4 tuberías para alimentar con cada una a uno de los pilotos, utilizando una cuadrícula de tubería de PVC de 1/2 pulgada de diámetro, con orificios circulares de 1/16 de pulgada, de manera que se distribuya de manera uniforme el caudal.

Se instalan válvulas cerca de cada uno de los extremos y una válvula de cierre general para todo el sistema. La diferencia de elevación total entre el nivel del agua en el RAFA y el sistema de distribución de agua en cada piloto es de 25 cm, por lo que se dispone de una carga total de 0.25 mca.

En la figura 13 se muestra un esquema del sistema de distribución de caudal para los pilotos y en la figura 14 un detalle de la cuadrícula de tubería sobre cada piloto, mientras que en la figura 18 se aprecia el resultado final.

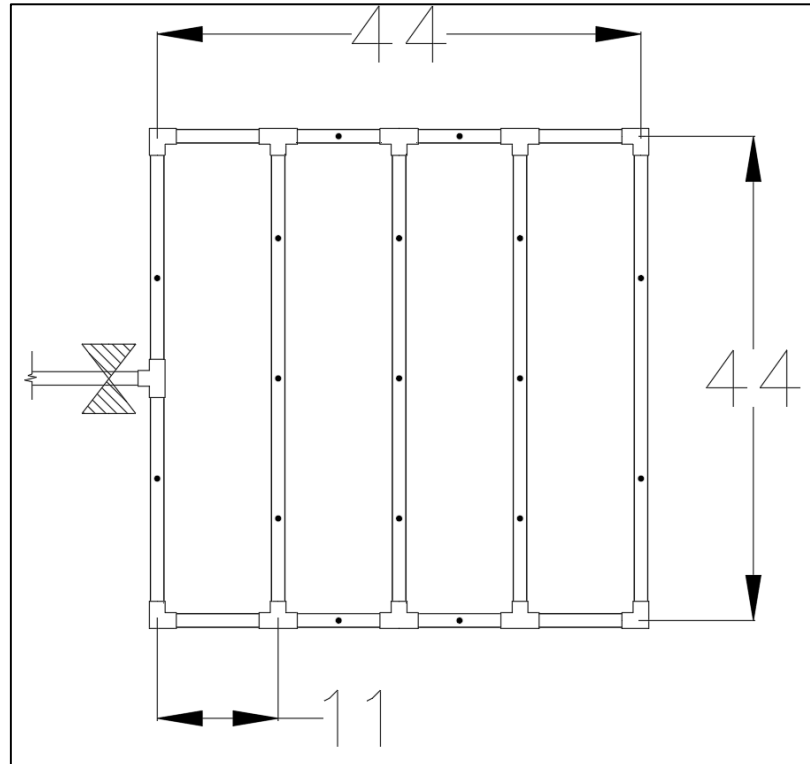
Figura 13. Esquema del sistema de distribución de caudal



Nota: Dimensiones en cm.

Fuente: elaboración propia, utilizando AutoCAD.

Figura 14. **Cuadrícula de tubería para distribución de caudal sobre cada piloto**



Nota: Dimensiones en cm.

Fuente: elaboración propia, utilizando AutoCAD.

En el punto de desvío de caudal en el RAFA se instala también una malla fina que funciona como filtro, ya que al no recibir purgas nunca, el reactor genera un exceso de lodos que posteriormente mueren y flotan hacia la superficie, lo cual puede obstruir la tubería de distribución.

2.2.2.6. Sistema de aireación

Se instalan dos tipos de sistema de aireación para los pilotos, según el material permeable que se utiliza para cada uno:

- Sistema de aireación activo para pilotos con antracita: consiste en una tubería de PVC de 1/2 pulgada de diámetro, con perforaciones de 1/8 de pulgada de diámetro y forma cuadrada que se ubica en una de las capas de material permeable a media altura del piloto. La tubería sube hasta la superficie para conectar el soplador mecánico (ver figura 15).
- Sistema de aireación pasivo para pilotos con piedra de cantera: consiste en una tubería de PVC de 2.5 pulgadas de diámetro, la cual se instala sin agujeros, y va desde el fondo falso hasta la superficie, de manera que permite la circulación del aire hasta el fondo del piloto (ver figura 15).

Figura 15. **Fotografías de sistemas de aireación utilizados en los pilotos**



Fuente: Urbanización Los Cenízaros, Aserrí.

2.2.3. Materiales

Los materiales por utilizar se consiguen con relativa facilidad en el medio local, y fue posible obtenerlos a costos bajos o inclusive de manera gratuita, esta información se resume en la tabla VI.

Tabla VI. **Forma de obtención de los materiales para los pilotos**

Material	Lugar en que se obtuvo	Pago
Piedra cuarta	Se compró en distribuidor de Quebrador Ochoмого	De pago
Piedra quintilla	Se compró en distribuidor de Quebrador Ochoмого	De pago
Tubería de PVC	Se compró en ferretería local Las Gravilias	De pago
Estañones	Se compraron en comercio local Recipientes Durán	De pago
Antracita	Donado por el AyA, material previamente utilizado en potabilización de agua	Gratuito
Piedra de cantera	Material de desecho recolectado en un terreno local y posteriormente tamizado	Gratuito
Bolsas de yute	Se compraron sacos en Fibras de Centroamérica	De pago
Suelo arenoso	Material de desecho recolectado en un terreno local y posteriormente secado	Gratuito
Suelo limoso	Material excavado en terreno local	Gratuito
Hierro	Material de desecho donado por comercio local Taller Industrial Villanea	Gratuito
Aserrín	Material de desecho donado por comercio local Aserradero San Sebastián	Gratuito
Carbón activado	Donado por el AyA	Gratuito

Fuente: elaboración propia.

Algunos de los materiales requirieron de trabajo adicional después de obtenidos, ellos se enlistan a continuación:

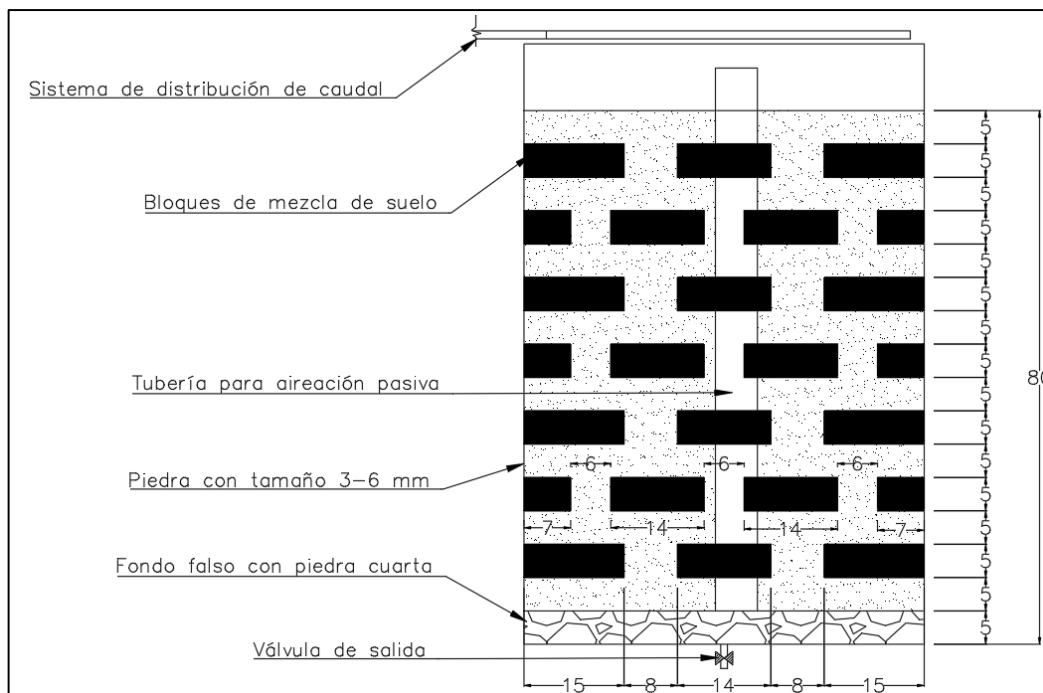
- Piedra de cantera: tamizado a través de dos mallas para seleccionar únicamente el material con tamaño aproximado entre los 3 y 6 mm.
- Bolsas de yute: corte de los sacos para obtener las bolsas de las dimensiones deseadas.

- Suelo arenoso: secado al sol.
- Suelo limoso: secado al sol.
- Hierro: mezclado y triturado hasta alcanzar un tamaño menor a 2 cm.
- Aserrín: secado al sol.

2.2.4. Diseño final de los pilotos

Los esquemas de la figura 16 y figura 17 muestran las dos posibles configuraciones del diseño final para los cuatro pilotos instalados. Adicionalmente, la tabla VII numera e indica las características de cada sistema.

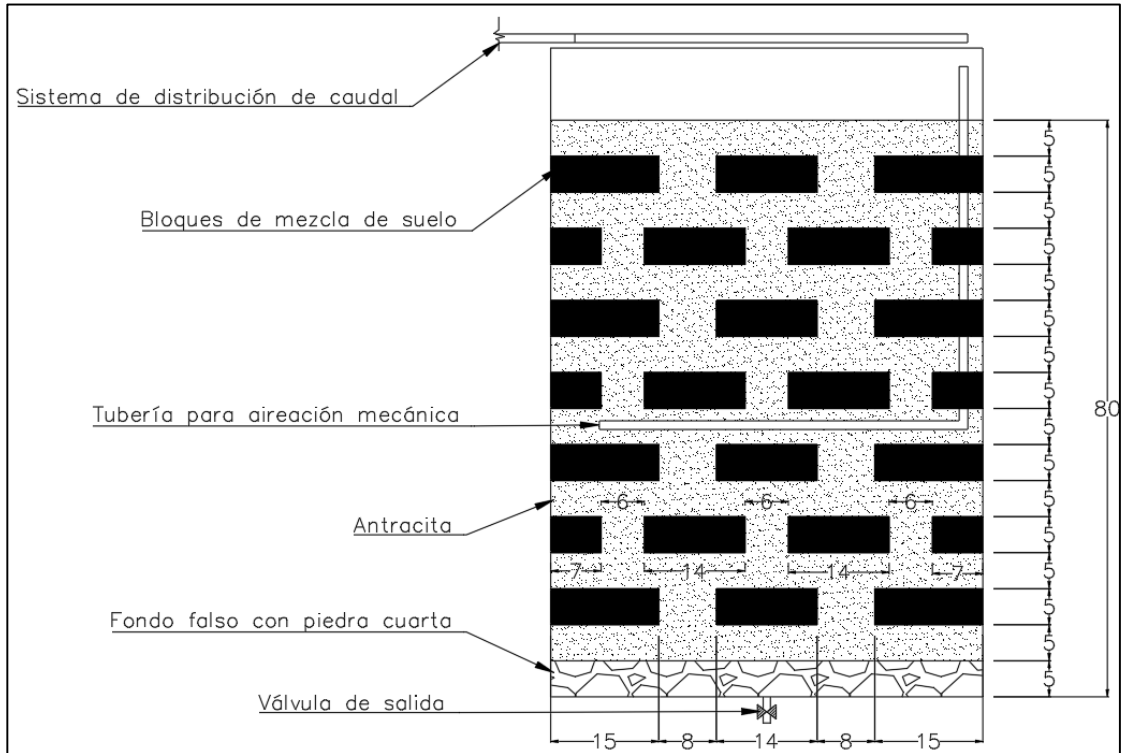
Figura 16. Esquema de diseño final de pilotos con piedra



Nota: Dimensiones en cm.

Fuente: elaboración propia, utilizando AutoCAD.

Figura 17. Esquema de diseño final de pilotos con antracita



Nota: Dimensiones en cm.

Fuente: elaboración propia, utilizando AutoCAD.

Tabla VII. Numeración y características de cada piloto instalado

Característica	Piloto 1	Piloto 2	Piloto 3	Piloto 4
Material permeable	Antracita	Piedra	Antracita	Piedra
Suelo utilizado en la mezcla	Arenoso	Arenoso	Limoso	Limoso
Sistema de aireación	Activo	Pasivo	Activo	Pasivo
Capas de material permeable	8	8	8	8
Capas de bloques de suelo	7	7	7	7

Fuente: elaboración propia.

2.2.5. Instalación de los pilotos

Para la construcción y puesta en marcha de los pilotos se procedió a obtener, preparar y almacenar los materiales en una bodega del AyA, ubicada en Curridabat de San José. Posteriormente se hizo el traslado de todos los materiales listos hacia la PTAR de la Urbanización Los Cenízaros, y se realizó el montaje en el sitio.

Se aprovechó una estructura de biofiltro que se encuentra fuera de operación para colocar los pilotos, utilizando tarimas como base y evitando cualquier alteración del proceso usual que realiza la planta de tratamiento. El Apéndice V ilustra con mayor detalle el proceso de armado de los pilotos, mientras que la figura 18 muestra el resultado final.

Figura 18. **Fotografías de pilotos instalados en la PTAR Los Cenízaros**



Fuente: Urbanización Los Cenízaros, Aserrí.

2.2.6. Operación y mantenimiento

Con el fin de garantizar el buen funcionamiento de los pilotos instalados, es necesario realizar actividades periódicas en el sistema, estas actividades se realizan 3 veces a la semana, e incluyen:

- Limpieza de hojas, telarañas y suciedad en la superficie y alrededores de los pilotos.
- Manipulación de válvulas con el fin de evitar el taponamiento del sistema de distribución de caudal.
- Purga del sistema de distribución de caudal.
- Medición y calibración del caudal.
- Limpieza de la tubería de derivación de caudal en el RAFA.
- Revisión general en busca de algún problema que requiera mantenimiento.

Adicionalmente, se cuenta con la operación y mantenimiento que recibe la PTAR Los Cenízaros por parte del personal de la ASADA, 2 o 3 veces a la semana, lo cual incluye el canal de rejas, desarenador y desengrasador.

2.3. Evaluación del funcionamiento

A continuación, detalles de la evaluación del funcionamiento.

2.3.1. Parámetros de control

Con el fin de evaluar la calidad del efluente de los pilotos, así como determinar la eficiencia de remoción de diferentes contaminantes, se miden los siguientes parámetros antes y después de los sistemas MSL:

- Caudal (in situ)
- Demanda Bioquímica de Oxígeno
- Demanda Química de Oxígeno
- Sólidos suspendidos totales
- Potencial de Hidrógeno (in situ)
- Temperatura (in situ)
- Nitrógeno
 - Nitrógeno amoniacal
 - Nitritos
 - Nitratos
- Fósforo
 - Fósforo reactivo
 - Ortofosfatos

Adicionalmente, se miden otros parámetros complementarios para contar con más información acerca del desempeño de los pilotos:

- Oxígeno disuelto (in situ)
- Sólidos totales
- Sólidos disueltos totales
- Turbiedad
- Color

Estos ensayos se realizan en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica. Los métodos utilizados en el laboratorio son descritos con mayor detalle en el anexo 7, mientras que el apéndice 6 muestra fotografías de los ensayos realizados en el laboratorio y en el sitio.

Adicionalmente, el Laboratorio Nacional de Aguas (LNA) de Costa Rica, que es parte del AyA, realizó ensayos en las muestras tomadas en una de las fechas, con el fin de realizar un control cruzado de los resultados obtenidos en la UCR y agregar información acerca de algunos parámetros de calidad.

Los ensayos realizados por el LNA incluyen:

- Demanda Bioquímica de Oxígeno
- Demanda Química de Oxígeno
- Sólidos totales
- Sólidos suspendidos totales
- Sólidos disueltos totales
- Sustancias activas al azul de metileno
- Nitrógeno
 - Nitrógeno Kjeldahl
- Fósforo
 - Fósforo total

2.3.2. Número de muestras

Para determinar el número de muestras a evaluar para cada uno de los parámetros de calidad, se utiliza el método propuesto por el manual *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, edición número 23, publicada por la *American Public Health Association (APHA)*, *American Water Works Association (AWWA)* y *Water Environment Federation (WEF)* en el año 2017.

El manual establece que, para una matriz móvil como el agua, se puede determinar el número de muestras con la ecuación 1.

$$N \geq \left(\frac{t*s}{U} \right)^2 \quad (1)$$

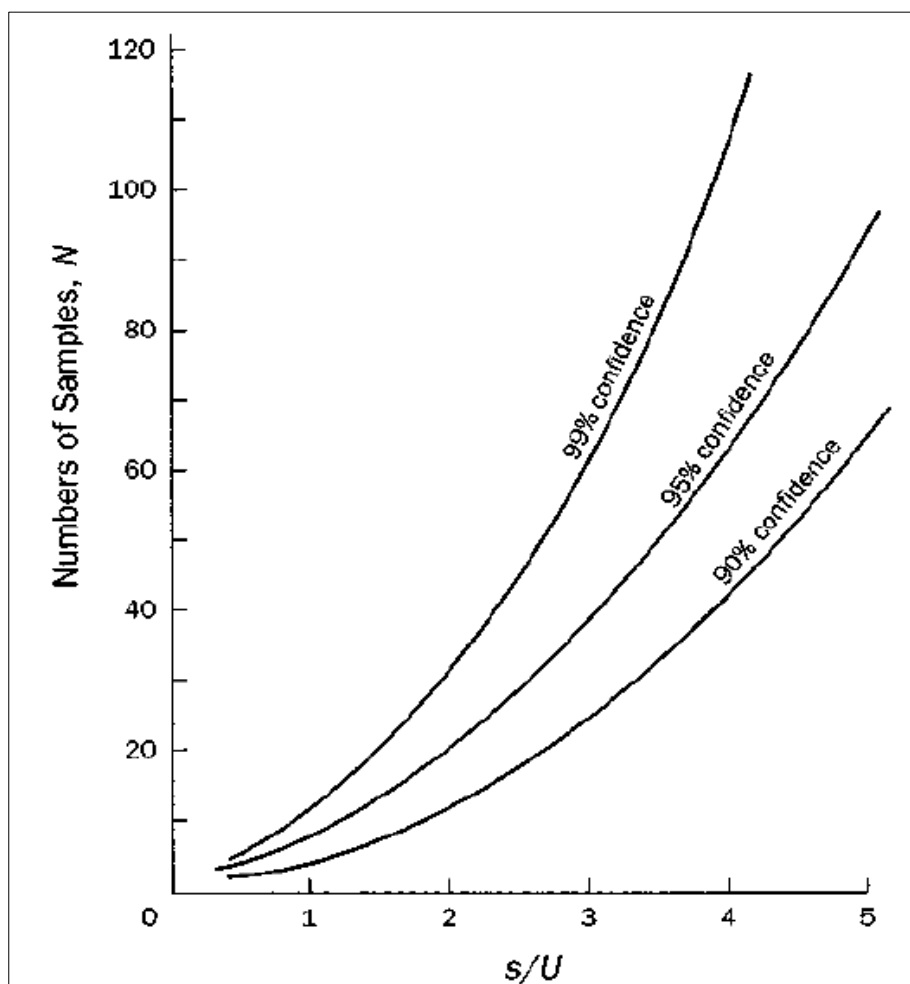
Donde:

- N: es el número de muestras
- t: es la t de Student para un nivel de confianza determinado
- s: es la desviación estándar
- U: es el nivel aceptable de incertidumbre de la medición

Los valores de “s” para cada uno de los parámetros a medir son tomados, de manera inicial, según lo indicado en el *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, que contiene datos estadísticos obtenidos en numerosos ensayos de laboratorio.

Por otro lado, los valores de “U” son consultados en los manuales del fabricante de los equipos que se utilizan para realizar las pruebas de laboratorio, según el método de medición elegido para cada caso. Una vez que se cuenta con estos valores, se puede utilizar un gráfico similar al que se aprecia en la Figura 19, que relaciona s/U a diferentes niveles de confianza con el valor de número de muestras a recolectar.

Figura 19. Gráfica para estimar número de muestras por utilizar



Fuente: BAIRD *et al.* *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, Edición 23. p.5.

El gráfico de la figura 19 se basa en la distribución de t de Student, sin embargo, su forma depende del tamaño de muestra, por lo que la curva podría variar respecto a la aproximación presentada en el *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*.

Por esta razón se utiliza la calculadora de tamaño muestral GRANMO para realizar la estimación³², ya que se basa en el mismo principio que la metodología propuesta en el *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, pero ajusta sus resultados para cada caso particular.

Los datos utilizados para el cálculo del número de muestras, así como el resultado inicial para los diferentes parámetros, se muestran en la tabla VIII.

Tabla VIII. **Cálculo de número de muestras para diferentes parámetros**

Parámetro	Desv. Estándar (s)	Equipo para medición	Incert. (U)	N para 95% confianza
DBO (mg/L)	30.5	Velp Scientifica DBO S. 6	18	12
DQO (mg/L)	13	Colorímetro Hach DR900	15	3
SST (mg/L)	2.8	Balanza ADAM PGL 303	2.35	6
N amoniacal (mg/L de NH ₃ -N)	0.038	Colorímetro Hach DR700	0.02	14
Nitritos (mg/L de NO ₂ --N)	0.005	Colorímetro Hach DR900	0.003	11
Nitratos (mg/L de NO ₃ --N)	0.005	Colorímetro Hach DR900	0.05	1
P reactivo (mg/L PO ₄ 3--)	0.024	Colorímetro Hach DR900	0.02	6
pH (U)	0.10	Hach HQd Portable Meter	0.05	16

Fuente: elaboración propia, adaptado de BAIRD *et al.* *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* y MARRUGAT, Jaume. *Calculadora de Tamaño Muestral GRANMO*.

³² MARRUGAT, Jaime. *Calculadora de Tamaño Muestral GRANMO del Instituto Municipal de Investigación Médica de Barcelona*.

Los resultados de tamaño muestral aseguran, al nivel de confianza deseado, que el promedio obtenido será representativo, de acuerdo con la precisión del equipo y la desviación estándar esperada para ese parámetro.

El resultado más crítico, de los parámetros medidos en laboratorio, es el de DBO, que indica que una muestra aleatoria de 14 individuos es suficiente para estimar, con una confianza del 95 % y una precisión de +/- 0.02 unidades, la media poblacional de unos valores que es previsto que tengan una desviación estándar de alrededor de 0.038 unidades³³.

Por lo tanto, se decide realizar, como mínimo, 14 muestreos para evaluar todos los parámetros de calidad en laboratorio y 16 muestreos para evaluar los parámetros que se miden in situ.

2.3.3. Puntos de muestreo

Los puntos de muestreo definidos corresponden a sitios justo antes y justo después de los pilotos MSL.

- Muestreo antes de pilotos MSL: se realiza en el efluente del RAFA, aprovechando la válvula de purga del sistema de distribución de caudal de los pilotos (ver figura 20).
- Muestreo después de pilotos MSL: se realiza en la válvula de salida de cada uno de los pilotos (ver figura 21).

³³ MARRUGAT, Jaime. *Calculadora de Tamaño Muestral GRANMO del Instituto Municipal de Investigación Médica de Barcelona [Programa de cálculo online]*.

Figura 20. **Punto de muestreo antes de los pilotos**



Fuente: Urbanización Los Cenízaros, Aserrí.

Figura 21. **Punto de muestreo después de cada piloto**



Fuente: Urbanización Los Cenízaros, Aserrí.

2.3.4. Tipo de muestra

La configuración de la PTAR en la Urbanización Los Cenízaros hace que el desengrasador y el RAFA actúen como amortiguadores de los picos de caudal y de carga contaminante que ingresan a la planta. Adicionalmente, el caudal que ingresa a los pilotos es controlado por el sistema de distribución.

Adicionalmente, el bajo caudal de los pilotos instalados hace que transcurra aproximadamente una hora en el proceso de toma de muestras, por lo que se tiene un resultado compuesto a lo largo de esa hora.

Por estas razones, se utilizan muestras simples a la salida del RAFA y a la salida de cada uno de los pilotos de sistema MSL, ya que se considera que son representativas para el sistema.

2.3.5. Frecuencia de muestreo

Se realiza un muestreo por semana durante todo el periodo de ejecución de esta investigación, de manera que se alcance la cantidad mínima de muestras estimada mediante el análisis estadístico.

2.3.6. Procesamiento de los datos obtenidos

Con las mediciones efectuadas en laboratorio y en campo, se realizan tablas resumen para cada parámetro de calidad y se indican los valores mínimos y máximos registrados, se calcula el promedio y la desviación estándar. También se elaboran gráficos para mostrar el comportamiento de los valores a lo largo del tiempo.

Para los resultados de DBO, DQO, SST, Nitrógeno amoniacal y Fósforo reactivo se calcula el porcentaje de remoción para cada muestra, y su valor promedio.

Los valores promedio de los distintos indicadores de calidad son comparados con la norma costarricense para descarga de aguas residuales a cuerpos de agua, de manera que se verifica el cumplimiento para el efluente de cada uno de los pilotos.

2.4. Evaluación de la viabilidad de un sistema de tratamiento de aguas residuales

La viabilidad es un análisis que tiene como objetivo conocer la probabilidad de que un proyecto o tecnología se logre implementar con éxito. Para el caso de sistemas de tratamiento de aguas residuales, determinar la viabilidad de una tecnología en particular ayudará a tener una idea acerca de la sostenibilidad del proyecto.

Un proyecto de saneamiento que no es sostenible presentará problemas de tipo social, económico, técnico y ambiental, lo cual representa una afectación para la comunidad en donde se ubica y otras comunidades aguas abajo.

2.4.1. Viabilidad técnica

Con el fin de evaluar la probabilidad de implementar satisfactoriamente un sistema MSL en una comunidad rural de Costa Rica, se toman en cuenta los siguientes aspectos:

- Disponibilidad de materiales necesarios para la construcción.
- Capacidad constructiva de la comunidad.

- Capacitación del personal que operaría la PTAR.
- Capacidad para cumplir con el reglamento de vertido de aguas residuales tratadas del país.

2.4.2. Viabilidad económica

Para un sistema de tratamiento de aguas residuales, los ingresos se componen de los pagos mensuales que los beneficiarios del sistema realizarían, por lo que se debe comprobar que la capacidad de pago sea suficiente para cubrir los gastos de operación y mantenimiento que el sistema requiere. En este apartado se consideran los siguientes aspectos:

- Estimación de los costos de construcción del sistema y su financiamiento.
- Estimación de los costos mensuales de operación y mantenimiento de la planta de tratamiento.
- Capacidad de pago de la población por beneficiar.
- Tarifas aprobadas en el país para sistemas similares.

3. RESULTADOS

3.1. Caracterización de los materiales

Se obtiene información acerca de las propiedades de los materiales utilizados, con el fin de aportar información que pueda enriquecer el análisis de resultados de este y futuros trabajos. Algunas caracterizaciones fueron brindadas por los fabricantes o distribuidores, mientras que otras se realizaron en laboratorio como parte de esta investigación.

En cuanto a los materiales descritos por fabricantes y distribuidores se tiene:

- Piedra cuarta (ver anexo 3).
- Piedra quintilla (ver anexo 4).
- Carbón activado (ver anexo 5).
- Antracita (ver anexo 6).

Las pruebas de laboratorio realizadas a los otros materiales se ilustran en el apéndice 1. Y se obtienen las siguientes caracterizaciones:

- Suelo limoso (ver apéndice 2)
- Suelo arenoso (ver apéndice 3)
- Piedra (ver apéndice 4)

La tabla IX muestra un resumen de los resultados obtenidos.

Tabla IX. **Resumen de resultados de caracterización de materiales**

Parámetro / Muestra	Limo	Arena	Piedra
pH (U)	6.99	7.48	-
Contenido orgánico (%)	28	8	-
Clasificación SUCS	SM	SM	SP-SM
Clasificación AASHTO	A-7-5	A-2-4	A-1-a
Límite Líquido (%)	61	0	0
Límite Plástico (%)	36.7	0	0
Índice Plasticidad (%)	24.3	0	0
Fracción pasando #200 (%)	36	16	8.2
Fracción grava (%)	0	2.75	31.3
Fracción arena (%)	63.86	81.24	60.47
Gs a 20°	2.632	2.63	-
D60 (mm)	0.34	0.82	4.4
D30 (mm)	-	0.22	3.22
D10 (mm)	-	-	2.44
Coefficiente de uniformidad	-	-	1.8
Grado de curvatura	-	-	0.97

Fuente: elaboración propia.

3.2. Agua residual cruda

Para tener más información y contexto acerca del tratamiento que se lleva a cabo en la PTAR de la Urbanización Los Cenízanos, se aportan datos acerca de la calidad del agua cruda que ingresa a la planta (ver tabla X). Como aproximación inicial, se cuenta con dos ensayos de laboratorio realizados por las empresas Agrotec y SyC Ambiental, las cuales se encuentran debidamente acreditadas para realizar análisis de aguas residuales en Costa Rica.

Tabla X. **Parámetros de calidad del agua residual cruda, Urb. Los Cenízaros**

Parámetro	jun-18	jul-20
DBO (mg/L)	335	285
DQO (mg/L)	595	842
Relación DBO/DQO	0.56	0.34
pH (U)	8.62	8.63
Grasas y aceites (mg/L)	48	83.4
Sólidos sedimentables (mL/L)	3.4	2.5
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	192	276
Temperatura (°C)	21.8	24.2
Sustancias activas al azul de metileno (mg/L)	15.2	6.6

Fuente: elaboración propia, adaptado de CRUZ, Nathalie. *Reporte operacional PTAR Urbanización Los Cenízaros*. p.7 y MONTENEGRO, Alejandra. *Reporte Analítico PTAR Urbanización Los Cenízaros*. p.1.

3.3. Proceso de estabilización biológica

Todo sistema de tratamiento biológico, incluyendo los sistemas MSL, requieren un tiempo de estabilización biológica de entre antes de mostrar su desempeño real.

Se realizaron muestreos y pruebas de laboratorio durante las primeras semanas de funcionamiento de los pilotos, con el fin de obtener información acerca de la evolución de los procesos que se llevan a cabo en ellos.

La fecha de referencia para el inicio de la estabilización es el 20 de enero de 2021, y aunque se mostró remoción de DBO y DQO desde los primeros días, los resultados para los parámetros de Nitrógeno y Fósforo arrojaron valores esperados a partir del 12 de febrero de 2021.

Por lo tanto, se estima que el proceso de estabilización biológica para el sistema tomó un poco más de 3 semanas en realizarse.

3.4. Resultados parámetros de calidad de aguas residuales

Se realizaron 17 muestreos de los sistemas durante el desarrollo de la presente investigación, los cuales fueron numerados de la “A” hasta la “P”. Así mismo, el Laboratorio Nacional de Aguas del AyA realizó pruebas de laboratorio en la muestra “O”, aportando también resultados para el trabajo, llamados “LNA”. La tabla XI muestra las horas y fechas en que se realizaron los muestreos.

Tabla XI. **Fechas y horas de los muestreos realizados**

Muestra	Fecha	Día de la semana	Hora
A	22-ene	Viernes	4:00 p. m.
B	29-ene	Viernes	4:00 p. m.
C	04-feb	Jueves	9:00 a. m.
D	12-feb	Viernes	2:00 p. m.
E	18-feb	Jueves	4:00 p. m.
F	25-feb	Jueves	12:30 p. m.
G	04-mar	Jueves	3:30 p. m.
H	11-mar	Jueves	4:30 p. m.
I	18-mar	Jueves	4:30 p. m.
J	23-mar	Martes	4:00 p. m.
K	04-abr	Domingo	4:00 p. m.
L	07-abr	Miércoles	3:00 p. m.
M	16-abr	Viernes	2:00 p. m.
N	23-abr	Viernes	2:30 p. m.
Ñ	28-abr	Miércoles	8:30 a. m.
O	20-may	Jueves	7:30 a. m.
LNA	20-may	Jueves	7:30 a. m.
P	27-may	Miércoles	5:00 p. m.

Fuente: elaboración propia.

3.4.1. Caudal

Se midió el caudal de cada unidad MSL mediante el método volumétrico, con lo cual se calculó la carga hidráulica superficial (CHS). El diámetro de los pilotos es de 60 cm, por lo que el área de cada uno es de aproximadamente 0.2827 m². Los resultados se muestran en la tabla XII.

Tabla XII. **Resultados de caudal para los pilotos MSL**

Mue s-tra	P1		P2		P3		P4	
	Q (m ³ /d)	CHS (L/m ² - d)	Q (m ³ /d)	CHS (L/m ² - d)	Q (m ³ /d)	CHS (L/m ² - d)	Q (m ³ /d)	CHS (L/m ² - d)
A	-	-	-	-	-	-	-	-
B	-	-	-	-	-	-	-	-
C	0.193	682.60	0.142	502.22	0.145	512.83	0.134	473.93
D	0.129	456.24	0.142	502.22	0.134	473.93	0.150	530.52
E	0.129	456.24	0.142	502.22	0.134	473.93	0.150	530.52
F	0.146	517.93	0.184	650.16	0.144	511.00	0.164	578.75
G	0.180	636.62	0.201	710.65	0.196	694.49	0.204	720.70
H	0.155	547.63	0.126	445.45	0.142	500.95	0.117	412.94
I	0.172	608.72	0.189	670.13	0.187	661.42	0.144	511.00
J	0.146	516.18	0.158	557.62	0.111	393.79	0.107	377.26
K	0.139	491.28	0.100	355.32	0.160	565.88	0.097	344.12
L	0.168	594.51	0.178	628.76	0.121	427.98	0.145	514.44
M	0.163	576.56	0.136	481.98	0.166	587.65	0.142	500.95
N	0.154	545.67	0.143	505.92	0.184	650.16	0.120	423.24
Ñ	0.240	848.83	0.124	440.31	0.237	839.50	0.173	611.15
O	0.154	545.67	0.136	481.98	0.118	417.46	0.149	528.68
LNA	-	-	-	-	-	-	-	-
P	0.114	402.08	0.160	565.88	0.105	372.66	0.154	545.67
Prom	0.159	561.784	0.151	533.39	0.152	538.91	0.143	506.92

Fuente: elaboración propia.

3.4.2. Temperatura

Se midió la temperatura a la entrada de los sistemas y a la salida de cada piloto, esta determinación se realizó en el sitio, al mismo tiempo que se tomaban las muestras. Los resultados se muestran en la tabla XIII.

Tabla XIII. **Resultados de temperatura para los pilotos MSL**

Muestra	Fecha	Temperatura (°C)				
		Entrada	P1	P2	P3	P4
A	22-ene	-	-	-	-	-
B	29-ene	-	-	-	-	-
C	04-feb	22.00	26.00	25.50	26.50	25.10
D	12-feb	21.70	24.20	24.60	23.80	24.30
E	18-feb	22.60	25.80	25.30	25.00	24.60
F	25-feb	21.80	23.60	22.40	22.90	22.60
G	04-mar	20.80	25.00	23.60	24.20	23.40
H	11-mar	21.20	22.10	21.80	21.90	22.30
I	18-mar	21.60	22.30	23.10	22.80	23.30
J	23-mar	21.20	22.30	22.60	21.70	22.00
K	04-abr	21.30	24.00	23.00	23.90	22.90
L	07-abr	23.60	25.40	24.80	25.60	24.20
M	16-abr	23.80	22.80	22.70	22.40	22.40
N	23-abr	21.80	24.00	24.40	23.30	23.00
Ñ	28-abr	21.30	20.90	20.95	20.60	20.70
O	20-may	21.60	21.20	20.60	21.20	20.60
LNA	20-may	-	-	-	-	-
P	27-may	21.50	21.40	21.40	21.20	21.30
Promedio		21.85	23.40	23.12	23.13	22.85

Fuente: elaboración propia.

3.4.3. pH

Se midió el potencial de Hidrógeno a la entrada de los sistemas y a la salida de cada piloto, esta determinación se realizó en el sitio, al mismo tiempo que se tomaban las muestras. Los resultados se muestran en la tabla XIV.

Tabla XIV. Resultados de pH para los pilotos MSL

Muestra	Fecha	pH (U)				
		Entrada	P1	P2	P3	P4
A	22-ene	-	-	-	-	-
B	29-ene	7.30	6.85	7.03	6.63	7.12
C	04-feb	7.17	6.81	7.14	6.43	7.18
D	12-feb	7.16	6.98	7.33	6.92	7.09
E	18-feb	7.17	6.59	6.91	6.48	7.12
F	25-feb	7.33	6.85	7.13	6.63	7.12
G	04-mar	7.17	6.55	7.03	6.51	6.93
H	11-mar	7.30	6.55	6.98	6.78	6.97
I	18-mar	7.40	6.66	7.06	6.65	6.92
J	23-mar	7.26	6.70	6.99	6.60	6.96
K	04-abr	7.26	6.65	6.95	6.51	7.06
L	07-abr	7.36	6.60	7.14	6.47	7.16
M	16-abr	7.08	6.57	6.97	6.59	7.02
N	23-abr	7.32	6.95	7.14	6.58	7.07
Ñ	28-abr	7.22	6.60	7.06	6.63	7.12
O	20-may	7.40	6.58	6.91	6.69	6.98
LNA	20-may	-	-	-	-	-
P	27-may	7.13	6.89	7.03	6.91	7.08
Promedio		7.25	6.71	7.05	6.63	7.06

Fuente: elaboración propia.

3.4.4. Oxígeno disuelto

Se midió el oxígeno disuelto a la entrada de los sistemas y a la salida de cada piloto, esta determinación se realizó en el sitio, al mismo tiempo que se tomaban las muestras. Los resultados se muestran en la tabla XV.

Tabla XV. Resultados de oxígeno disuelto para los pilotos MSL

Muestra	Fecha	Oxígeno Disuelto (mg/L)				
		Entrada	P1	P2	P3	P4
A	22-ene	-	-	-	-	-
B	29-ene	-	-	-	-	-
C	04-feb	0.39	1.73	3.72	1.98	3.09
D	12-feb	0.46	1.83	3.68	2.54	3.21
E	18-feb	0.51	2.30	2.60	2.31	3.61
F	25-feb	0.69	1.89	3.60	2.18	3.38
G	04-mar	0.48	2.28	3.11	2.13	3.01
H	11-mar	0.34	2.23	3.32	2.06	3.19
I	18-mar	0.47	1.99	2.45	2.13	2.76
J	23-mar	0.40	2.09	2.74	2.13	3.00
K	04-abr	0.56	2.82	3.06	2.72	3.20
L	07-abr	0.36	2.95	3.04	2.94	2.99
M	16-abr	0.26	2.42	3.22	2.06	3.36
N	23-abr	0.19	2.77	2.99	2.22	3.29
Ñ	28-abr	0.47	2.68	2.70	1.72	3.07
O	20-may	0.31	4.17	3.35	3.72	2.38
LNA	20-may	-	-	-	-	-
P	27-may	0.46	4.90	3.78	5.02	3.54
Promedio		0.42	2.60	3.16	2.52	3.14

Fuente: elaboración propia.

3.4.5. DBO

Se realizaron ensayos de DBO_{5,20} para la entrada del sistema y cada uno de los pilotos MSL. Los resultados se muestran en la tabla XVI.

Tabla XVI. Resultados de DBO para los pilotos MSL

Mues- tra	En- trada	P1		P2		P3		P4	
		DBO (mg/L)	% rem.	DBO (mg/L)	% rem.	DBO (mg/L)	% rem.	DBO (mg/L)	% rem.
A	135.46	13.39	90 %	39.53	71 %	16.84	88 %	44.41	67 %
B	234.55	23.82	90 %	52.88	77 %	32.94	86 %	64.88	72 %
C	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D	127.04	21.11	83 %	20.48	84 %	18.02	86 %	30.23	76 %
E	196.02	16.86	91 %	43.31	78 %	16.41	92 %	43.91	78 %
F	180.20	23.27	87 %	42.81	76 %	15.60	91 %	35.00	81 %
G	128.23	13.89	89 %	34.18	73 %	28.50	78 %	42.16	67 %
H	117.38	16.80	86 %	33.87	71 %	14.80	87 %	25.46	78 %
I	154.80	13.90	91 %	49.40	68 %	15.10	90 %	30.10	81 %
J	162.08	14.50	91 %	36.27	78 %	15.43	90 %	29.41	82 %
K	186.30	14.64	92 %	41.69	78 %	15.59	92 %	33.80	82 %
L	-	-	-	-	-	-	-	-	-
M	155.11	14.25	91 %	33.38	78 %	17.25	89 %	31.01	80 %
N	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ñ	180.00	23.86	87 %	37.03	79 %	43.38	76 %	40.50	78 %
O	147.00	9.20	94 %	34.00	77 %	8.60	94 %	43.00	71 %
LNA	128.00	2.00	98 %	10.00	92 %	3.00	98 %	10.00	92 %
P	93.00	7.60	92 %	14.20	85 %	12.80	86 %	14.40	85 %
Prom.	155.01	15.27	90 %	34.87	78 %	18.28	88 %	34.55	78 %

Fuente: elaboración propia.

Debido a diversos problemas con la disponibilidad del equipo de medición y el acceso a laboratorios, solamente fue posible medir DBO para las muestras de 6 fechas distintas, estos datos se muestran en color rojo.

Los demás valores son estimados con la relación DBO/DQO promedio calculada para las 6 muestras mencionadas.

3.4.6. DQO

Se realizaron ensayos de DQO para la entrada del sistema y cada uno de los pilotos MSL. Los resultados se muestran en la tabla XVII.

Tabla XVII. Resultados de DQO para los pilotos MSL

Mues- tra	En- trada	P1		P2		P3		P4	
		DQO (mg/L)	% rem.	DQO (mg/L)	% rem.	DQO (mg/L)	% rem.	DQO (mg/L)	% rem.
A	251.00	41.00	84 %	78	69 %	46.00	82 %	82.00	67 %
B	434.60	72.92	83 %	104.35	76 %	89.98	79 %	119.80	72 %
C	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D	235.40	64.63	73 %	40.42	83 %	49.22	79 %	55.82	76 %
E	363.20	51.62	86 %	85.47	76 %	44.82	88 %	81.07	78 %
F	333.90	71.24	79 %	84.47	75 %	42.62	87 %	64.63	81 %
G	237.60	42.52	82 %	67.45	72 %	77.85	67 %	77.85	67 %
H	217.50	51.42	76 %	66.83	69 %	40.42	81 %	47.02	78 %
I	224.20	49.22	78 %	75.64	66 %	47.02	79 %	60.22	73 %
J	300.32	44.37	85 %	71.57	76 %	42.15	86 %	54.30	82 %
K	345.20	44.82	87 %	82.26	76 %	42.58	88 %	62.42	82 %
L	-	-	-	-	-	-	-	-	-
M	258.52	29.44	89 %	47.02	82 %	29.12	89 %	49.22	81 %
N	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ñ	267.32	49.22	82 %	71.24	73 %	99.92	63 %	60.22	77 %
O	293.76	29.44	90 %	58.02	80 %	22.85	92 %	64.63	78 %
LNA	330.00	70.00	79 %	61	82 %	15.00	95 %	66.00	80 %
P	240.88	20.66	91 %	34.81	86 %	47.02	80 %	22.85	91 %
Prom.	288.89	48.83	83 %	68.57	76 %	49.10	82 %	64.54	78 %

Fuente: elaboración propia.

3.4.7. SST

Se realizaron ensayos de sólidos suspendidos totales para la entrada del sistema y cada uno de los pilotos MSL. Los resultados se muestran en la tabla XVIII.

Tabla XVIII. Resultados de SST para los pilotos MSL

Mues- tra	En- trada	P1		P2		P3		P4	
		SST (mg/L)	% rem.	SST (mg/L)	% rem.	SST (mg/L)	% rem.	SST (mg/L)	% rem.
A	-	-	-	-	-	-	-	-	-
B	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D	74	7	91 %	8	89 %	4	95 %	7	91 %
E	123	27	78 %	39	68 %	20	84 %	29	76 %
F	114	38	67 %	37	67 %	18	84 %	24	79 %
G	77	13	83 %	20	74 %	13	83 %	13	83 %
H	85	3	96 %	14	83 %	2	98 %	6	93 %
I	108	2	98 %	14	87 %	7	94 %	8	93 %
J	95	9	91 %	22	77 %	11	88 %	10	90 %
K	95	16	83 %	26	73 %	11	88 %	21	78 %
L	131	9	93 %	27	79 %	8	94 %	25	81 %
M	112	7	94 %	12	89 %	7	94 %	17	85 %
N	68	3	96 %	15	78 %	2	97 %	10	85 %
Ñ	86	15	83 %	20	77 %	12	86 %	18	79 %
O	84	7	92 %	22	74 %	13	85 %	20	76 %
LNA	86	4	95 %	21	75 %	10	88 %	12	86 %
P	70	9	87 %	10	86 %	9	87 %	6	91 %
Prom.	93.89	11.29	88 %	20.49	78 %	9.83	90 %	15.07	84 %

Fuente: elaboración propia.

3.4.8. SDT

Se midieron los sólidos disueltos totales para la entrada del sistema y cada uno de los pilotos MSL. Los resultados se muestran en la tabla XIX.

Tabla XIX. **Resultados de SDT para los pilotos MSL**

Muestra	Fecha	SDT (mg/L)				
		Entrada	P1	P2	P3	P4
A	22-ene	-	-	-	-	-
B	29-ene	-	-	-	-	-
C	04-feb	-	-	-	-	-
D	12-feb	504.80	452.80	390.10	428.30	452.30
E	18-feb	480.60	391.60	478.30	440.00	412.50
F	25-feb	489.40	346.90	400.80	361.10	363.40
G	04-mar	487.50	313.80	333.50	347.90	351.40
H	11-mar	492.50	353.80	353.20	378.30	380.80
I	18-mar	458.40	360.20	347.60	326.20	315.10
J	23-mar	475.40	326.70	343.40	346.80	340.60
K	04-abr	409.70	278.60	313.90	320.30	317.10
L	07-abr	459.90	346.40	362.70	398.50	361.30
M	16-abr	370.60	245.10	269.90	252.40	266.50
N	23-abr	-	-	-	-	-
Ñ	28-abr	-	-	-	-	-
O	20-may	-	-	-	-	-
LNA	20-may	724.29	615.60	664.67	621.60	622.00
P	27-may	-	-	-	-	-
Promedio		486.64	366.50	387.10	383.76	380.27

Fuente: elaboración propia.

3.4.9. Sólidos totales

Se estiman los valores de sólidos totales a la entrada del sistema y para cada uno de los pilotos, mediante la suma de SST y SDT. Los resultados se muestran en la tabla XX.

Tabla XX. **Resultados de sólidos totales para los pilotos MSL**

Muestra	Fecha	ST (mg/L)				
		Entrada	P1	P2	P3	P4
A	22-ene	-	-	-	-	-
B	29-ene	-	-	-	-	-
C	04-feb	-	-	-	-	-
D	12-feb	578.76	459.80	398.10	432.30	459.30
E	18-feb	603.58	418.60	517.30	460.00	441.50
F	25-feb	602.92	384.90	437.80	379.10	387.40
G	04-mar	564.90	326.80	353.50	360.90	364.40
H	11-mar	577.21	356.80	367.20	380.30	386.80
I	18-mar	566.76	362.20	361.60	333.20	323.10
J	23-mar	570.86	335.70	365.40	357.80	350.60
K	04-abr	504.30	294.60	339.90	331.30	338.10
L	07-abr	590.62	355.40	389.70	406.50	386.30
M	16-abr	482.40	252.10	281.90	259.40	283.50
N	23-abr	-	-	-	-	-
Ñ	28-abr	-	-	-	-	-
O	20- may	-	-	-	-	-
LNA	20- may	810.29	620.00	686.00	632.00	634.00
P	27- may	-	-	-	-	-
Promedio		586.60	378.81	408.95	393.89	395.91

Fuente: elaboración propia.

3.4.10. Fósforo reactivo

Se realizaron ensayos de sólidos suspendidos totales para la entrada del sistema y cada uno de los pilotos MSL. Los resultados se muestran en la tabla XXI.

Tabla XXI. Resultados de Fósforo reactivo para los pilotos MSL

Mues- tra	En- trada	P1		P2		P3		P4	
		P react (mg/L PO ₄ ^{3--P})	% rem	P react (mg/L PO ₄ ^{3--P})	% rem	P react (mg/L PO ₄ ^{3--P})	% rem	P react (mg/L PO ₄ ^{3--P})	% rem
A	-	-	-	-	-	-	-	-	-
B	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D	10.20	0.23	98 %	3.10	70 %	3.59	65 %	5.49	46 %
E	9.67	0.82	92 %	6.14	36 %	4.31	55 %	4.80	50 %
F	-	-	-	-	-	-	-	-	-
G	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H	-	-	-	-	-	-	-	-	-
I	-	-	-	-	-	-	-	-	-
J	9.35	1.44	85 %	6.27	33 %	2.58	72 %	3.92	58 %
K	8.50	1.99	77 %	5.26	38 %	1.80	79 %	4.25	50 %
L	-	-	-	-	-	-	-	-	-
M	8.95	1.63	82 %	6.54	27 %	1.47	84 %	7.19	20 %
N	13.73	1.93	86 %	5.36	61 %	3.37	75 %	4.61	66 %
Ñ	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O	7.97	1.41	82 %	5.49	31 %	0.88	89 %	5.23	34 %
LNA	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P	7.45	1.37	82 %	3.99	46 %	0.56	93 %	3.14	58 %
Prom.	9.48	1.35	85 %	5.27	43 %	2.32	76 %	4.83	48 %

Fuente: elaboración propia.

3.4.11. Nitrógeno

Se muestra los resultados para distintos compuestos que contienen nitrógeno en las aguas residuales ensayadas.

3.4.11.1. Nitrógeno amoniacal

Se realizaron ensayos de nitrógeno amoniacal para la entrada del sistema y cada uno de los pilotos MSL. Los resultados se muestran en la tabla XXII.

Tabla XXII. **Resultados de nitrógeno amoniacal para los pilotos MSL**

Mues- tra	En- trada	P1		P2		P3		P4	
		N amon (mg/L NH ₃ -N)	% rem	N amon (mg/L NH ₃ -N)	% rem	N amon (mg/L NH ₃ -N)	% rem	N amon (mg/L NH ₃ -N)	% rem
A	20.00	0.74	96 %	11.6	42 %	12.60	37 %	12.20	39 %
B	21.00	-	-	-	-	-	-	-	-
C	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D	37.40	0.30	99 %	12.4	67 %	17.30	54 %	18.80	50 %
E	37.80	0.70	98 %	14.7	61 %	10.20	73 %	9.20	76 %
F	36.60	9.50	74 %	14.4	61 %	6.80	81 %	13.10	64 %
G	36.00	1.50	96 %	9.4	74 %	3.00	92 %	6.90	81 %
H	37.20	1.30	97 %	5	87 %	4.70	87 %	1.50	96 %
I	36.20	2.40	93 %	8.1	78 %	2.60	93 %	3.60	90 %
J	37.60	1.10	97 %	10.20	73 %	2.50	93 %	22.00	41 %
K	36.20	1.10	97 %	4.6	87 %	1.10	97 %	3.20	91 %
L	36.60	1.10	97 %	11.7	68 %	3.60	90 %	8.10	78 %
M	30.60	0.80	97 %	6.5	79 %	3.20	90 %	5.40	82 %
N	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ñ	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O	33.00	0.05	99 %	10	70 %	0.10	99 %	11.70	65 %
LNA	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P	31.20	0.40	99 %	2.9	91 %	0.10	99 %	2.40	92 %
Prom.	33.39	1.61	95 %	9.35	72 %	5.22	84 %	9.08	73 %

Fuente: elaboración propia.

3.4.11.2. Nitratos

Se realizaron ensayos de nitratos para la entrada del sistema y cada uno de los pilotos MSL. Los resultados se muestran en la tabla XXIII.

Tabla XXIII. Resultados de nitratos para los pilotos MSL

Muestra	Fecha	Nitratos (mg/L de NO ₃ ⁻ -N)				
		Entrada	P1	P2	P3	P4
A	22-ene	-	-	-	-	-
B	29-ene	-	-	-	-	-
C	04-feb	-	-	-	-	-
D	12-feb	3.4	54	66	60	36
E	18-feb	2.5	50	60	66	54
F	25-feb	5.2	37	42	41	40
G	04-mar	4.3	48	42	42	44
H	11-mar	3.3	28	60	45	44
I	18-mar	2.5	60	43	40	38
J	23-mar	4.6	45	33	41	29
K	04-abr	3.3	40	45	36	34
L	07-abr	4.4	46	27	83	36
M	16-abr	4.9	35	29	33	24
N	23-abr	4.5	36	30	42	30
Ñ	28-abr	-	-	-	-	-
O	20-may	3.1	26	11	18	9
LNA	20-may	-	-	-	-	-
P	27-may	1.4	26	33	29	19
Promedio		3.65	40.85	40.08	44.31	33.62

Fuente: elaboración propia.

3.4.11.3. Nitritos

Se realizaron ensayos de nitritos para la entrada del sistema y cada uno de los pilotos MSL. Los resultados se muestran en la tabla XXIV.

Tabla XXIV. Resultados de nitritos para los pilotos MSL

Muestra	Fecha	Nitritos (mg/L de NO ₂ ⁻ -N)				
		Entrada	P1	P2	P3	P4
A	22-ene	-	-	-	-	-
B	29-ene	-	-	-	-	-
C	04-feb	-	-	-	-	-
D	12-feb	0.018	7.6	10.3	12.4	4.1
E	18-feb	0.011	5.0	6.9	8.4	9.7
F	25-feb	0.043	0.2	7.2	0.8	5.8
G	04-mar	0.009	0.3	7.2	0.4	7.8
H	11-mar	-	-	-	-	-
I	18-mar	-	-	-	-	-
J	23-mar	0.002	0.2	3.1	0.1	0.8
K	04-abr	0.005	0.3	2.4	0.5	4.1
L	07-abr	-	-	-	-	-
M	16-abr	0.015	0.5	2.1	0.6	4.3
N	23-abr	0.013	0.5	2.6	0.7	4.8
Ñ	28-abr	-	-	-	-	-
O	20-may	0.019	0.2	0.8	0.7	0.5
LNA	20-may	-	-	-	-	-
P	27-may	0.002	0.01	0.20	0.06	0.50
Promedio		0.01	1.48	4.28	2.47	4.24

Fuente: elaboración propia.

3.4.12. Turbiedad

Se midió la turbiedad a la entrada de los sistemas y a la salida de cada piloto, con el fin de tener un parámetro objetivo acerca del aspecto del agua en el sistema, esta determinación se realizó en laboratorio mediante colorímetro. Los resultados se muestran en la tabla XXV.

Tabla XXV. **Resultados de turbiedad para los pilotos MSL**

Muestra	Fecha	Turbiedad (FAU)				
		Entrada	P1	P2	P3	P4
I	18-mar	240	3	19	9	10
J	23-mar	197	8	23	10	8
K	04-abr	226	12	25	9	21
L	07-abr	277	11	32	5	26
M	16-abr	241	6	14	6	17
N	23-abr	111	8	21	4	14
Ñ	28-abr	220	16	22	10	20
O	20-may	205	6	27	11	23
LNA	20-may	-	-	-	-	-
P	27-may	169	9	11	6	6
Promedio		209.56	8.78	21.56	7.78	16.11

Fuente: elaboración propia.

3.4.13. Color

Se midió el color aparente a la entrada de los sistemas y a la salida de cada piloto, con el fin de tener un parámetro objetivo acerca del aspecto del agua en el sistema, esta determinación se realizó en laboratorio mediante colorímetro. Los resultados se muestran en la tabla XXVI.

Tabla XXVI. **Resultados de color aparente para los pilotos MSL**

Muestra	Fecha	Color (U Pt-Co)			
		P1	P2	P3	P4
I	18-mar	63	208	90	118
J	23-mar	55	225	97	72
K	04-abr	124	250	99	200
L	07-abr	125	313	49	256
M	16-abr	44	127	56	125
N	23-abr	50	180	13	101
Ñ	28-abr	125	189	75	173
O	20-may	80	219	64	231
LNA	20-may	-	-	-	-
P	27-may	59	127	25	59
Promedio		80.56	204.22	63.11	148.33

Fuente: elaboración propia.

3.5. Resultados estimación de costos

Para realizar las estimaciones contenidas en esta sección del documento, se utilizan colones costarricenses, con un tipo de cambio de 614 colones por cada dólar estadounidense, a la fecha de junio 2021.

3.5.1. Costos de construcción

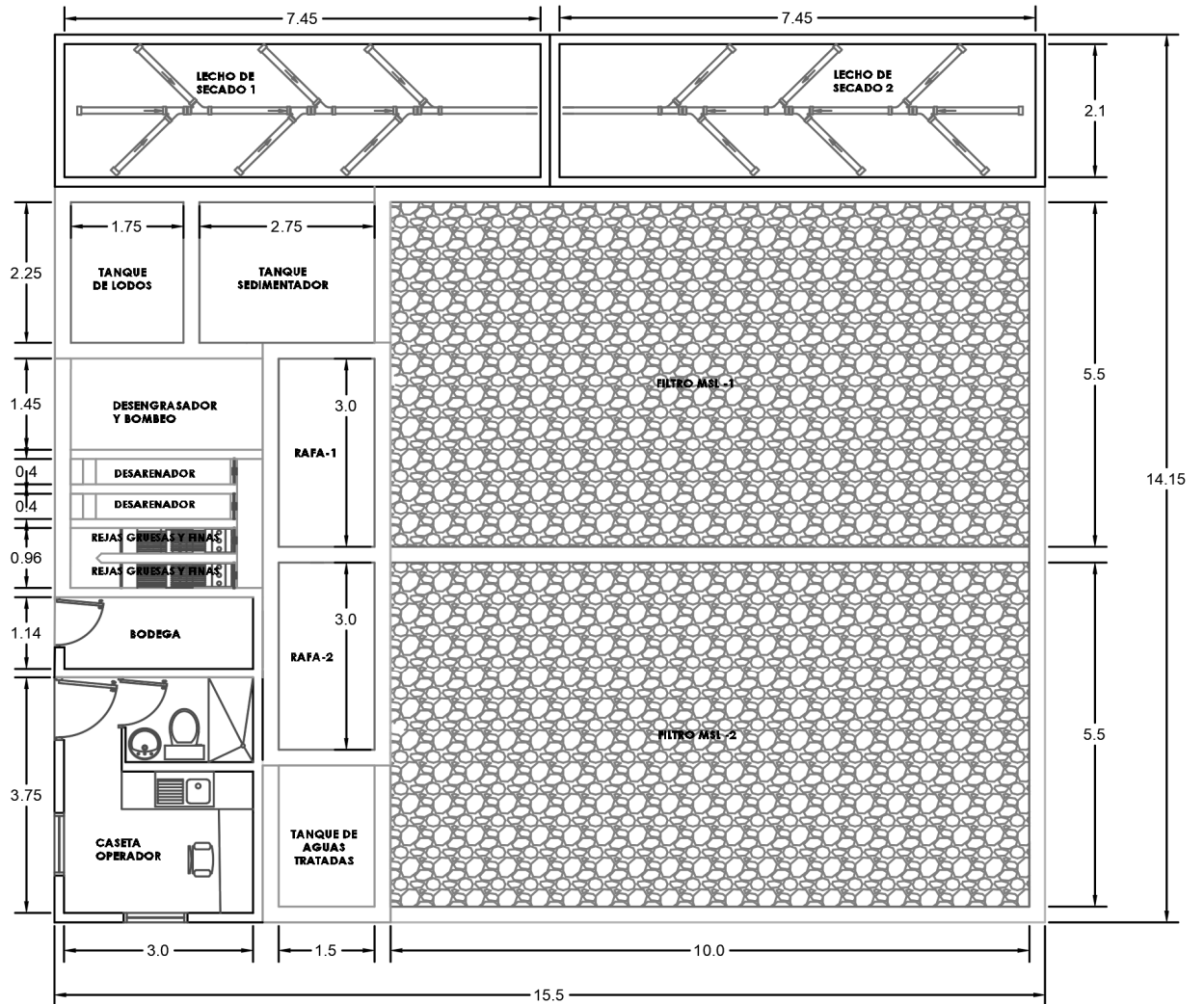
A manera de ejemplo, se calculan los costos para construir una planta de tratamiento de aguas residuales que atienda a 100 viviendas utilizando la tecnología MSL, incluyendo las demás obras requeridas para un correcto funcionamiento.

Para suponer un esquema de PTAR se asumen los siguientes valores como referencia:

- Hacinamiento: 4 personas/vivienda
- Dotación agua potable: 225 L/hab-día
- Factor de retorno: 0.8
- Carga hidráulica superficial MSL: 600 L/m²-día

Con estos datos se tiene que el caudal de diseño sería de 72 m³/día. Para este caudal se propone la distribución mostrada en la figura 22.

Figura 22. Esquema de distribución PTAR para estimación de costos



Nota: Dimensiones en metros.

Fuente: elaboración propia, utilizando AutoCAD.

Se mencionan a continuación las unidades que incluye la PTAR propuesta y el área aproximada que requiere cada una:

- Caseta de operador (11.25 m²)
- Bodega (3.4 m²)
- 2 unidades de canal de rejillas (2.88 m² en total)
- 2 unidades de canal desarenador (2.4 m² en total)

- Desengrasador y cárcamo de bombeo (4.35 m²)
- 2 unidades de RAFA (9 m² en total)
- 2 unidades de Filtro MSL (120 m² en total)
- Tanque de aguas tratadas (3.35 m²)
- Tanque sedimentador (6.2 m²)
- Tanque digestor de lodos (3.9 m²)
- 2 unidades de lechos de secado (31.3 m² en total)

De esta manera, el área total requerida por la PTAR y caseta de operación es de aproximadamente 225 m², a lo cual se debe agregar el área de los retiros que exige la legislación correspondiente, los cuales se miden en metros lineales, de las unidades de la planta hasta los linderos de la propiedad.

En la tabla XXVII se muestra un resumen de los costos estimados para la construcción de la planta de tratamiento propuesta. Así mismo, en el apéndice 7 se muestra el desglose completo del costo de PTAR y caseta de operación presupuestado para la obra.

Tabla XXVII. **Resumen de presupuesto para la PTAR propuesta**

RUBRO	COSTO (¢)
PTAR Y CASETA DE OPERACIONES	117,288,823.4
SUBTOTAL 1	117,288,823.4
IMPREVISTOS (6 %)	7,037,329.0
SUBTOTAL 2	124,326,152.4
ADMINISTRACIÓN (10 %)	12,432,615.2
TOTAL	¢136,758,767.67

Fuente: elaboración propia.

Este monto podría ser conseguido por medio de un aporte gubernamental, una donación de un organismo internacional, el aporte de los abonados, o bien, una combinación de las anteriores.

Con el fin de estimar una cuota mensual de un eventual financiamiento para este proyecto, se utilizan los siguientes datos:

- Monto total: ₡136,758,767.67
- Plazo para amortizar: 30 años
- Tasa de interés: 10 % anual

Con estos valores, la cuota mensual por pagar sería de ₡1,200,156.00. En caso de que el proyecto deba financiarse con el aporte comunal de las familias beneficiadas, correspondería a un monto aproximado de ₡12,000.00 por vivienda por mes.

3.5.2. Costos de operación y mantenimiento

Se consideran las actividades de operación y mantenimiento que se requieren para operar una PTAR, y más específicamente, las actividades particulares que se requieren para el sistema propuesto en la figura 22, el cual incluye unidades MSL.

Se toman valores de proyectos de saneamiento en ASADAS, en comunidades tales como Tobosi del Guarco, El Mora de Turrialba y Los Cenízaros de Aserrí, los cuales corresponden a plantas de tratamiento en comunidades rurales o semi urbanas de Costa Rica.

Estos valores son adaptados a la distribución propuesta, y se elabora la Tabla XXVIII que resume los costos promedio mensuales del sistema.

Tabla XXVIII. Costos mensuales para O y M de PTAR propuesta

Rubro	Monto anual	Monto mensual
Operario	₪ 3,209,446.92	₪ 267,453.91
Electricidad	₪ 1,470,000.00	₪ 122,500.00
Agua potable	₪ 35,872.31	₪ 2,989.36
Asesoría	₪ 979,140.77	₪ 81,595.06
Materiales	₪ 265,843.85	₪ 22,153.65
Imprevistos (10 % materiales)	₪ 26,584.38	₪ 2,215.37
Mantenimiento electromecánico	₪ 281,141.79	₪ 23,428.48
Análisis de laboratorio	₪ 188,382.00	₪ 15,698.50
Depreciación	₪ 638,120.77	₪ 53,176.73
Administración	₪ 274,783.08	₪ 22,898.59
Total	₪ 7,369,315.87	₪ 614,109.66
Costo promedio por vivienda	₪ 73,693.16	₪ 6,141.10

Fuente: elaboración propia.

De esta manera, se tendría un monto promedio mensual de ₪614,109.66 para operar la PTAR. Como se supuso el servicio para 100 viviendas, el costo mensual por vivienda sería de ₪6,141.10.

3.5.3. Tarifa estimada

Con la información presentada anteriormente, es posible calcular el costo mensual total que supondría para cada familia el servicio de tratamiento de aguas residuales con el sistema propuesto, el cual incluye unidades MSL. Se tienen dos escenarios posibles:

- La PTAR es financiada mediante el cobro a los usuarios:
 - Costo mensual aproximado por vivienda de ₡18,142.00
- La PTAR es donada por otra entidad:
 - Costo mensual aproximado por vivienda de ₡6,142.00

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. Discusión parámetros de calidad de aguas residuales

A continuación, se detallan los parámetros de calidad de aguas residuales.

4.1.1. Caudal

El caudal que ingresa a un sistema MSL está relacionado con la eficiencia de remoción de algunos contaminantes, como se observa en una recopilación de experimentos realizados con distintas tasas de carga hidráulica superficial³⁴.

En términos generales, una carga hidráulica superficial más baja presentará mayores porcentajes de remoción de contaminación orgánica y sólidos suspendidos. Por otro lado, una CHS mayor presentará menos problemas de colmatación y obstrucciones del sistema en el mediano y largo plazo.

Por estas razones, y tratando de llegar a un punto medio entre ambas ventajas, se desea lograr una CHS de entre 500 y 600 L/m²-día en el funcionamiento de los pilotos de este estudio especial.

Se presenta la tabla XXIX con el resumen de los resultados de caudal durante la realización del proyecto.

³⁴ AN et al. *Multi-Soil-Layering Systems for Wastewater Treatment in Small and Remote Communities*. p.138.

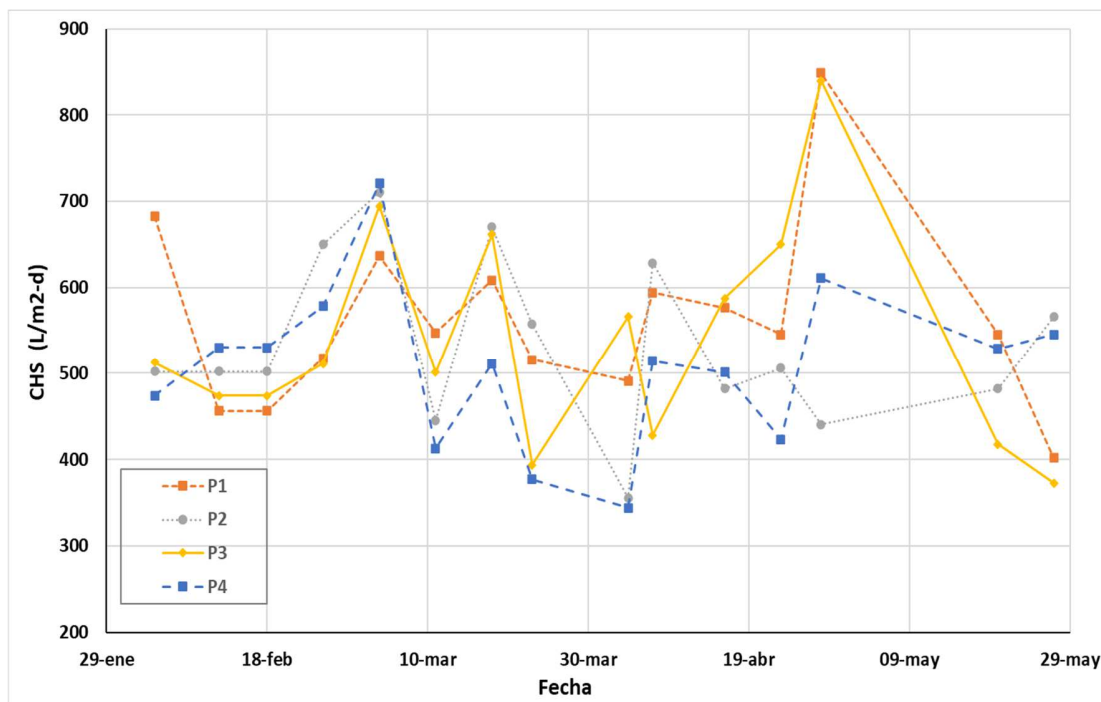
Tabla XXIX. Resumen de resultados para caudal en los pilotos MSL

Parámetro	P1	P2	P3	P4
Número de resultados	15	15	15	15
Valor Q max (m ³ /d)	0.240	0.201	0.237	0.204
Valor Q min (m ³ /d)	0.114	0.100	0.105	0.097
Q prom (m ³ /d)	0.159	0.151	0.152	0.143
Desv est. Q (m ³ /d)	0.031	0.027	0.036	0.027
CHS prom (L/m ² -d)	561.78	533.39	538.91	506.92

Fuente: elaboración propia.

Así mismo, en la que se puede apreciar el comportamiento de la carga hidráulica superficial en los pilotos a lo largo del tiempo.

Figura 23. Gráfico de carga hidráulica superficial para los pilotos MSL



Fuente: elaboración propia.

De los resultados se desprende que la CHS promedio obtenida se encuentra en el rango esperado, todas ellas con valores entre 500 y 600 L/m²-día.

Se aprecia también una variación considerable en los valores, aunque la mayoría se mantienen entre los 400 y 700 L/m²-día. Esta desviación se debe a la dificultad para calibrar el caudal con las válvulas de bola de ½" de PVC, ya que no son el accesorio indicado para este tipo de necesidad, también incide el leve cambio en el nivel del agua del RAFA a lo largo de los días y horas.

No se consideran perjudiciales para el sistema los valores extremos de CHS obtenidos en algunas fechas, ya que los filtros están recomendados para funcionar de manera adecuada a cargas de entre 200 y 800 L/m²-día³⁵.

4.1.2. Temperatura

La temperatura incide en todos los sistemas de tratamiento de tipo biológico, ya que tiene efectos sobre el crecimiento y comportamiento de los microorganismos. Los sistemas MSL muestran mejores resultados en países con clima tropical que aquellos con clima templado³⁶.

Debido a que Costa Rica se encuentra en una región tropical y es un país de poca extensión, no se encuentran variaciones extremas en su temperatura durante el año, y las diferencias entre regiones son relativamente pequeñas. La temperatura promedio del país se encuentra entre los 22 y 27 °C.

³⁵ AN *et al.* *Multi-Soil-Layering Systems for Wastewater Treatment in Small and Remote Communities*. p.135.

³⁶ LUANMANEE *et al.* *Treatment of domestic wastewater with a Multi-Soil-Layering System in a temperate and tropical climate*. p.7.

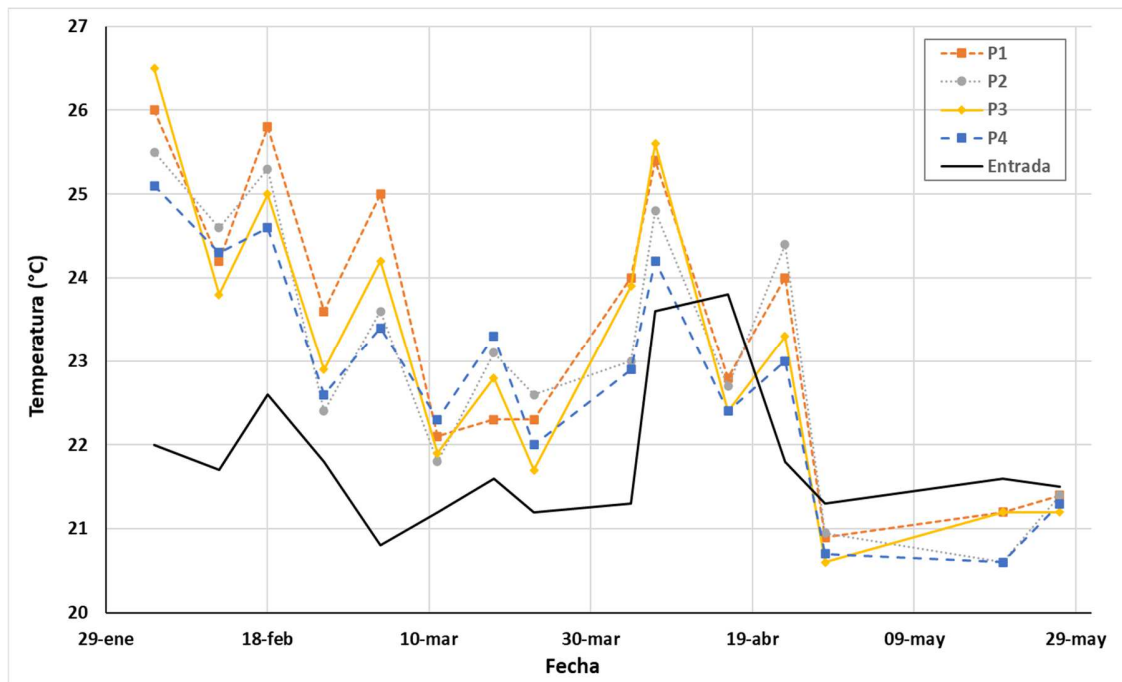
En la tabla XXX se presenta el resumen de los resultados de temperatura del agua durante la realización del proyecto, mientras que la figura 24 muestra la variación a lo largo del tiempo.

Tabla XXX. **Resumen de resultados para temperatura en los pilotos MSL**

Parámetro	Entrada	P1	P2	P3	P4
Número de resultados	15	15	15	15	15
Valor T max (°C)	23.8	26	25.5	26.5	25.1
Valor T min (°C)	20.8	20.9	20.6	20.6	20.6
T Promedio (°C)	21.85	23.40	23.12	23.13	22.85
Desv estándar (°C)	0.86	1.69	1.56	1.72	1.36

Fuente: elaboración propia.

Figura 24. **Gráfico de temperatura para los pilotos MSL**



Fuente: elaboración propia.

Se puede observar que la temperatura del efluente de los pilotos es mayor que la de la salida del RAFA, lo cual probablemente se debe a la mayor exposición al sol, ya que el reactor se encuentra techado y los pilotos no. La temperatura entre los pilotos no muestra diferencias significativas.

Los datos que muestran mayor temperatura en la entrada que en los pilotos corresponde con muestreos que se realizaron en momentos de lluvia.

Los valores obtenidos se encuentran dentro del rango esperado para el país y el distrito, para lo cual se debe considerar que la temperatura del agua suele ser menor que la del ambiente.

4.1.3. pH

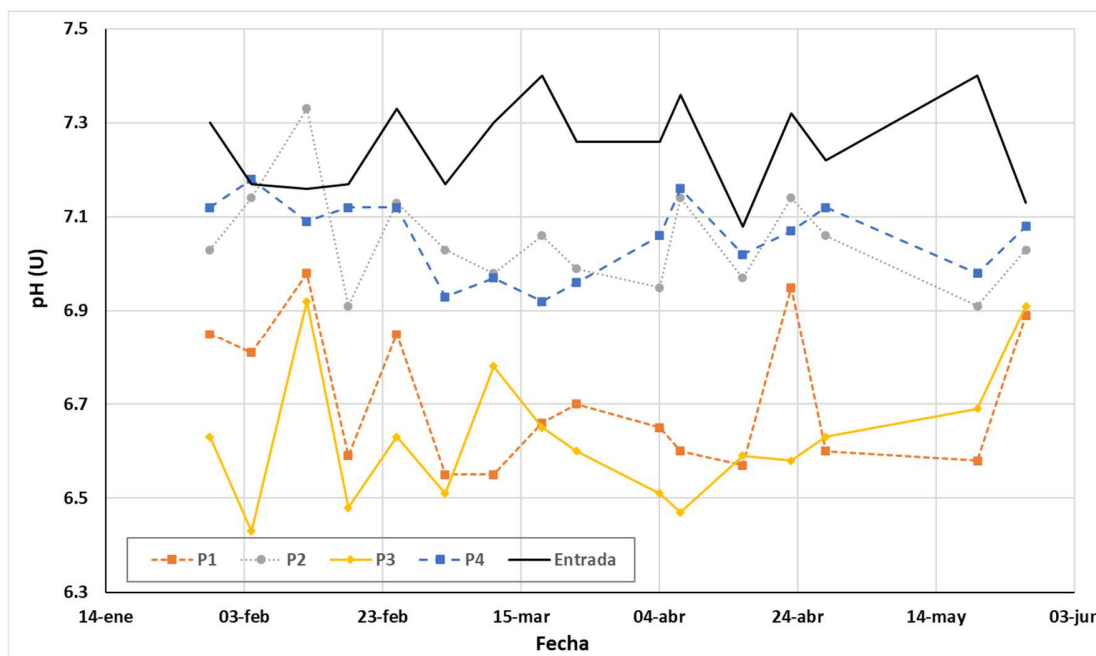
El pH es un indicador valioso acerca de los procesos que se dan a lo interno de un sistema de depuración de agua. Así mismo tiene una incidencia sobre la actividad biológica y química que ocurre, por lo que se requiere que se mantenga en ciertos rangos determinados para obtener mejores resultados.

El rango de pH ideal para mantener la eficiencia de un sistema MSL que trata aguas residuales municipales se encuentra entre 6.5 y 7³⁷.

En la Figura 25 se puede apreciar el comportamiento del pH a la entrada y salida de los pilotos a lo largo de los meses en que se realizó este estudio.

³⁷ AN et al. *Multi-Soil-Layering Systems for Wastewater Treatment in Small and Remote Communities*. p.139.

Figura 25. Gráfico de pH para los pilotos MSL



Fuente: elaboración propia.

Así mismo, se presenta la tabla XXXI con el resumen de los resultados de caudal durante la realización del proyecto. Cabe resaltar que todos los valores cumplen con los límites establecidos en el RVRAR de Costa Rica.

Tabla XXXI. Resumen de resultados para pH en los pilotos MSL

Parámetro	Entrada	P1	P2	P3	P4
Número de resultados	16	16	16	16	16
Valor pH max (U)	7.4	6.98	7.33	6.92	7.18
Valor pH min (U)	7.08	6.55	6.91	6.43	6.92
pH Promedio (U)	7.25	6.71	7.05	6.63	7.06
Desv estándar (U)	0.10	0.15	0.11	0.14	0.08

Fuente: elaboración propia.

Los resultados muestran que P1 y P3 presentan valores de pH cercanos a 6.65, mientras que los de P2 y P4 se encuentran alrededor de 7.05. Esto descarta la posibilidad de que el tipo de suelo utilizado en los bloques de suelo sea determinante en el pH de un filtro MSL, ya que el comportamiento no coincide con las parejas de pilotos que comparten tipo de suelo.

Otra posibilidad de esta diferencia en los resultados está relacionada con los procesos de remoción de nitrógeno:

“Cuando la nitrificación ocurre, se liberan iones de hidroxilo, y en consecuencia puede reducirse el valor de pH. En contraste, la desnitrificación produce iones de hidroxilo, y subsecuentemente se induce un mayor valor de pH en sistemas MSL”³⁸.

Tal como se discutirá más adelante en este documento, los pilotos P1 y P3 presentaron una mayor nitrificación, ya que convirtieron con mayor eficacia el nitrógeno amoniacal de entrada en nitratos y nitritos. Esto podría explicar la diferencia en los valores de pH.

4.1.4. Oxígeno disuelto

En la tabla XXXII se presenta el resumen de los resultados de oxígeno disuelto del agua a la entrada y salida de los pilotos MSL, mientras que la Figura 26 muestra la variación a lo largo del tiempo.

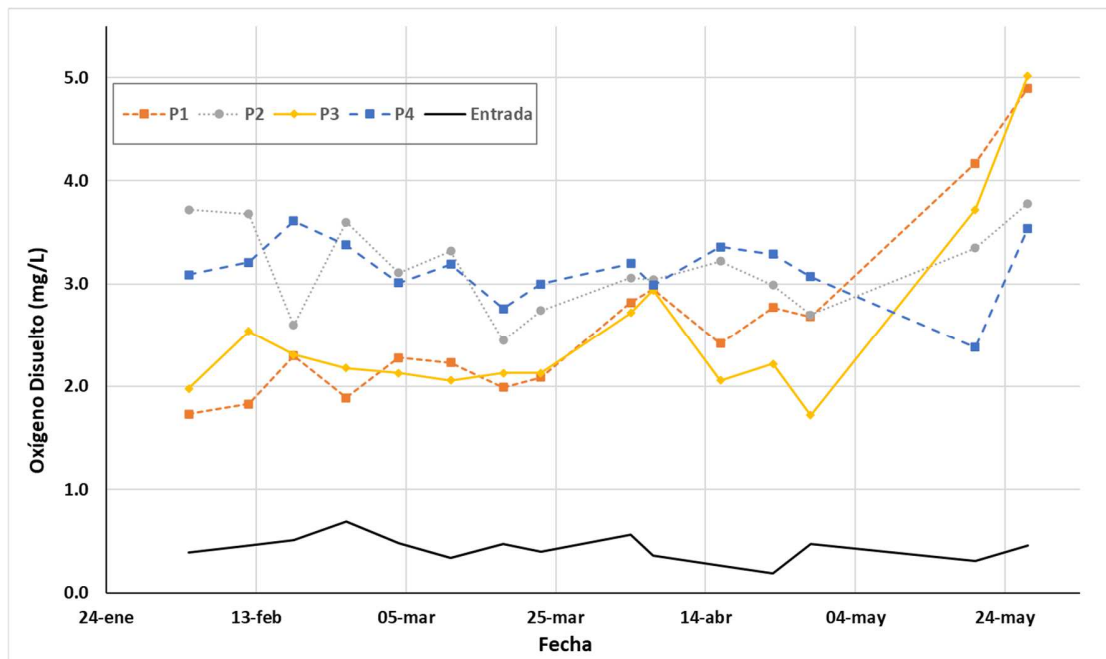
³⁸ LUANMANEE *et al.* *Treatment of domestic wastewater with a Multi-Soil-Layering System in a temperate and tropical climate.* p.5.

Tabla XXXII. Resumen de resultados para oxígeno disuelto en los pilotos MSL

Parámetro	Entrada	P1	P2	P3	P4
Número de resultados	15	15	15	15	15
Valor OD max (mg/L)	0.69	4.9	3.78	5.02	3.61
Valor OD min (mg/L)	0.19	1.73	2.45	1.72	2.38
OD prom (mg/L)	0.42	2.60	3.16	2.52	3.14
Desv estándar (mg/L)	0.12	0.88	0.42	0.84	0.31

Fuente: elaboración propia.

Figura 26. Gráfico de oxígeno disuelto para los pilotos MSL



Fuente: elaboración propia.

Los resultados muestran valores de oxígeno disuelto cercanos a cero para la salida del RAFA. Es esperable que estén arriba de cero debido a que el reactor

se encuentra descubierto, por lo que la parte superior, donde se toman las muestras, se encuentra en contacto con la atmósfera.

En el caso del efluente de los pilotos se observa una buena aireación en los sistemas, lo cual indica que se cumplen las condiciones aeróbicas en el material permeable. Los filtros MSL presentan condiciones anaeróbicas dentro de los bloques de suelo, pero es imposible comprobarlo en la realización de este experimento.

Los sistemas P2 y P4 muestran valores mayores de oxígeno disuelto, lo cual puede deberse a las características físicas del material permeable, ya que se trata de grava cuyo tamaño característico es aproximadamente 4 veces mayor al de la antracita utilizada en P1 y P3. Así mismo, P2 y P4 cuentan con un tubo para aireación pasiva del filtro.

Otra posible causa de esta diferencia es la eficiencia de remoción de contaminación, expresado como DBO y DQO. Más adelante se apreciará que P1 y P3 obtienen mayores porcentajes de remoción, por lo que consumen más oxígeno para degradar los contaminantes.

Esto, a su vez, se puede deber a una mayor área superficial de la antracita, lo cual permite que se alberguen más microorganismos por unidad de volumen.

4.1.5. DBO

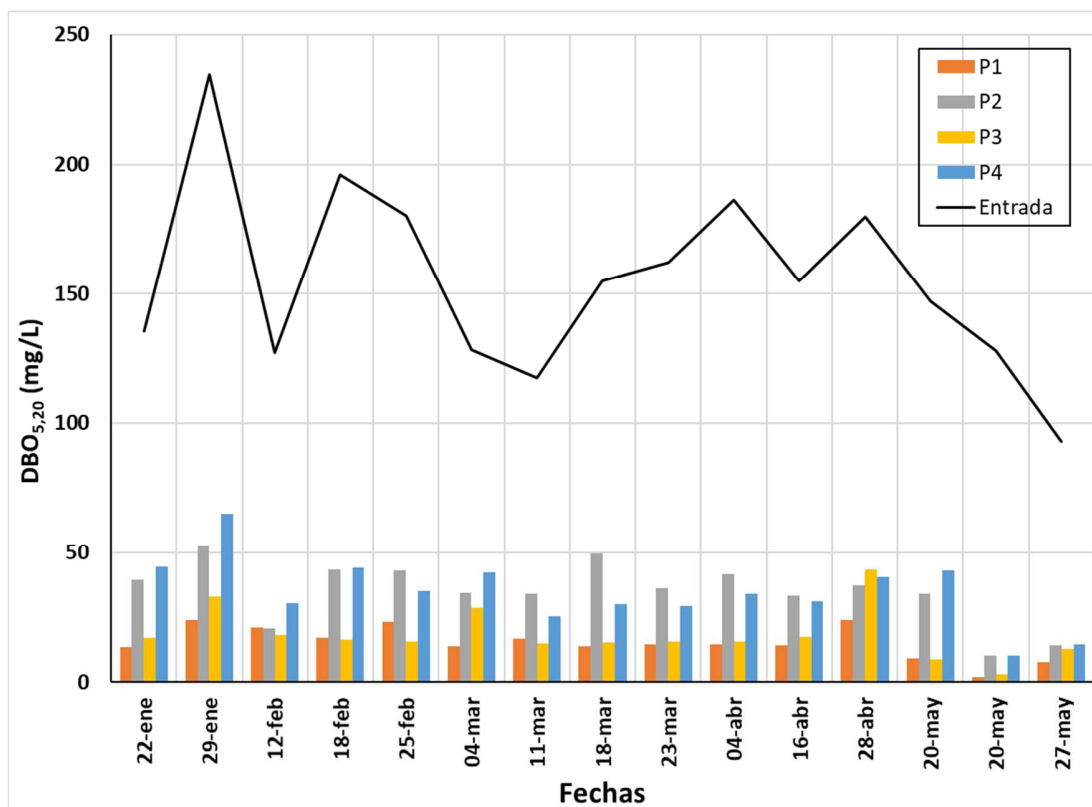
En la tabla XXXIII se presenta el resumen de los resultados de $DBO_{5,20}$ en la entrada y salida de los pilotos MSL, mientras que en la figura 27 se muestra la variación a lo largo del tiempo.

Tabla XXXIII. Resumen de resultados para DBO en los pilotos MSL

Parámetro	E	P1	P2	P3	P4
Número de resultados	15	15	15	15	15
Valor max (mg/L)	234.55	23.86	52.88	43.38	64.88
Valor min (mg/L)	93.00	2.00	10.00	3.00	10.00
DBO prom (mg/L)	155.01	15.27	34.87	18.28	34.55
Desv est. DBO (mg/L)	36.09	6.16	11.96	9.85	13.20
% remoción prom	-	90 %	78 %	88 %	78 %
Desv est. % rem	-	4 %	6 %	6 %	7 %

Fuente: elaboración propia.

Figura 27. Gráfico de DBO para los pilotos MSL



Fuente: elaboración propia.

Los resultados muestran un promedio de DBO de entrada a los pilotos de 155 mg/L. Este valor coincide con el comportamiento esperado de la PTAR hasta ese punto, ya que se tenían valores cercanos a 300 mg/L de entrada en el agua cruda, por lo que el pretratamiento y tratamiento primario (en este caso el RAFA) remueven aproximadamente el 50 % de la carga orgánica de entrada.

Posteriormente, el tratamiento secundario que realizan los pilotos muestra eficiencias de remoción por encima del 75 %, lo cual se considera adecuado para obtener los resultados que se desean, ya que todos los valores de DBO promedio de los efluentes cumplen con el límite de 50 mg/L que establece el RVRAR de Costa Rica.

Los resultados presentan consistencia a lo largo de los 5 meses en que se tomaron muestras, y una desviación estándar baja, por lo que se confirma la fiabilidad del sistema al ser utilizado como tratamiento secundario para remover DBO.

La figura 27 muestra que solamente una de las muestras superó levemente el límite establecido, y únicamente para los pilotos 2 y 4. Sin embargo, en esa muestra se aprecia que el valor de entrada de DBO fue anormalmente alto para el comportamiento usual de la PTAR.

Se aprecia una mayor remoción en los Pilotos 1 y 3, los cuales difieren en el tipo de suelo utilizado, pero coinciden en la utilización de antracita como material permeable. Esto lleva a pensar que el tipo de suelo no es tan determinante en la capacidad de remover DBO, y que el tipo de material permeable tiene más influencia en la eficiencia de depuración.

4.1.6. DQO

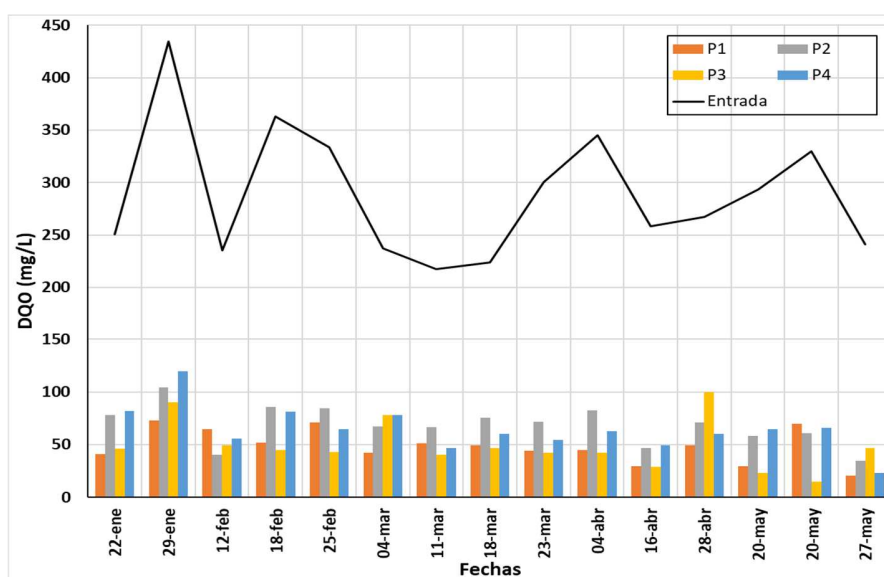
En la tabla XXXIV se presenta el resumen de los resultados de DQO en la entrada y salida de los pilotos MSL, mientras que en la figura 28 se muestra la variación a lo largo del tiempo.

Tabla XXXIV. Resumen de resultados para DQO en los pilotos MSL

Parámetro	E	P1	P2	P3	P4
Número de resultados	15	15	15	15	15
Valor max (mg/L)	434.6	72.92	104.345	99.92	119.8
Valor min (mg/L)	217.50	20.66	34.812	15	22.85
DQO prom (mg/L)	288.89	48.83	68.57	49.10	64.54
Desv est. DQO (mg/L)	61.93	15.76	18.38	23.26	21.24
% remoción prom	-	83 %	76 %	82 %	78 %
Desv est. % rem	-	5 %	6 %	9 %	6 %

Fuente: elaboración propia.

Figura 28. Gráfico de DQO para los pilotos MSL



Fuente: elaboración propia.

Los resultados muestran un promedio de DQO de entrada a los pilotos de 289 mg/L. Este valor coincide con el comportamiento esperado de la PTAR hasta ese punto, ya que se tenían valores promedio cercanos a 718 mg/L de entrada en el agua cruda, por lo que el pretratamiento y tratamiento primario (en este caso el RAFA) remueven cerca del 60 % de la carga contaminante de entrada.

Posteriormente, el tratamiento secundario que realizan los pilotos muestra eficiencias de remoción por encima del 75 %, lo cual se considera adecuado para obtener los resultados que se desean, ya que todos los valores de DQO promedio de los efluentes cumplen con el límite de 150 mg/L que establece el RVRAR de Costa Rica.

Los resultados presentan suficiente consistencia a lo largo de los 5 meses en que se tomaron muestras, y una desviación estándar aceptable, por lo que se confirma la fiabilidad del sistema al ser utilizado como tratamiento secundario para remover DQO. La figura 28 muestra que ninguna de las muestras superó el límite establecido en la legislación vigente.

Una vez más, se aprecia una mayor remoción en los pilotos 1 y 3, lo cual confirma que el tipo de suelo no es tan determinante en la capacidad de remover DQO, y que el tipo de material permeable tiene más influencia en la eficiencia de depuración.

Se intuye, además, que la mayor eficiencia para remover DBO y DQO se debe al área superficial y porosidad más elevadas con los que cuenta la antracita, lo cual permite la mayor proliferación de microorganismos. Esta misma característica ha hecho que en otros países se utilice Zeolita para sistemas MSL.

De esta manera, se considera que otros materiales porosos y con alta área superficial podrían ser utilizados en filtros MSL para obtener altas eficiencias de remoción, como es el caso de piedra volcánica, elementos plásticos especialmente diseñados, y otras opciones utilizadas en filtros percoladores, por ejemplo.

Sin embargo, se considera particularmente valioso el uso de grava, ya que consiste en un material sumamente sencillo de conseguir en zonas rurales, y que requeriría una baja inversión inicial y menos probabilidad de pagar transporte desde otra región. Esta conveniencia se refuerza al observar que los pilotos MSL construidos con grava lograron cumplir los valores límite establecidos por la legislación en términos de DBO y DQO.

4.1.7. Relación DBO/DQO

En la tabla XXXV se presenta la relación existente entre el DBO y el DQO de las 6 muestras para las que se cuenta con resultados en paralelo.

Tabla XXXV. Resultados de relación DBO/DQO para los pilotos MSL

Muestra	Fecha	Relación DBO/DQO				
		E	P1	P2	P3	P4
I	18-mar	0.69	0.28	0.65	0.32	0.50
M	16-abr	0.60	0.48	0.71	0.59	0.63
N	28-abr	0.67	0.48	0.52	0.43	0.67
O	20-may	0.50	0.31	0.59	0.38	0.67
LNA	20-may	0.39	0.03	0.16	0.20	0.15
P	27-may	0.39	0.37	0.41	0.27	0.63
Promedio		0.54	0.33	0.51	0.37	0.54

Fuente: elaboración propia.

Se aprecia que la relación para el efluente del RAFA varía entre 0.4 y 0.7, con un promedio de 0.54. Esta relación es consistente con los valores esperados,

ya que el agua residual doméstica la relación DBO/DQO se encuentra entre 0.4 y 0.8³⁹.

Por otro lado, para el caso del efluente de los pilotos, la relación DBO/DQO ronda 0.5 para los pilotos 2 y 4, pero se aproxima más a 0.35 para los pilotos 1 y 3. Esto se explica debido a que la eficiencia de remoción de DBO de P1 y P3 es mayor. Si se consideran los valores realmente bajos de DBO en estos efluentes, esto indica que la gran eficiencia de P1 y P3 para remover materia orgánica biodegradable hace que en el efluente quede una mayor proporción de materia no biodegradable, lo cual hace que baje la relación DBO/DQO.

4.1.8. SST

En la tabla XXXVI se presenta el resumen de los resultados de SST en la entrada y salida de los pilotos MSL, mientras que en la figura 29 se muestra la variación a lo largo del tiempo.

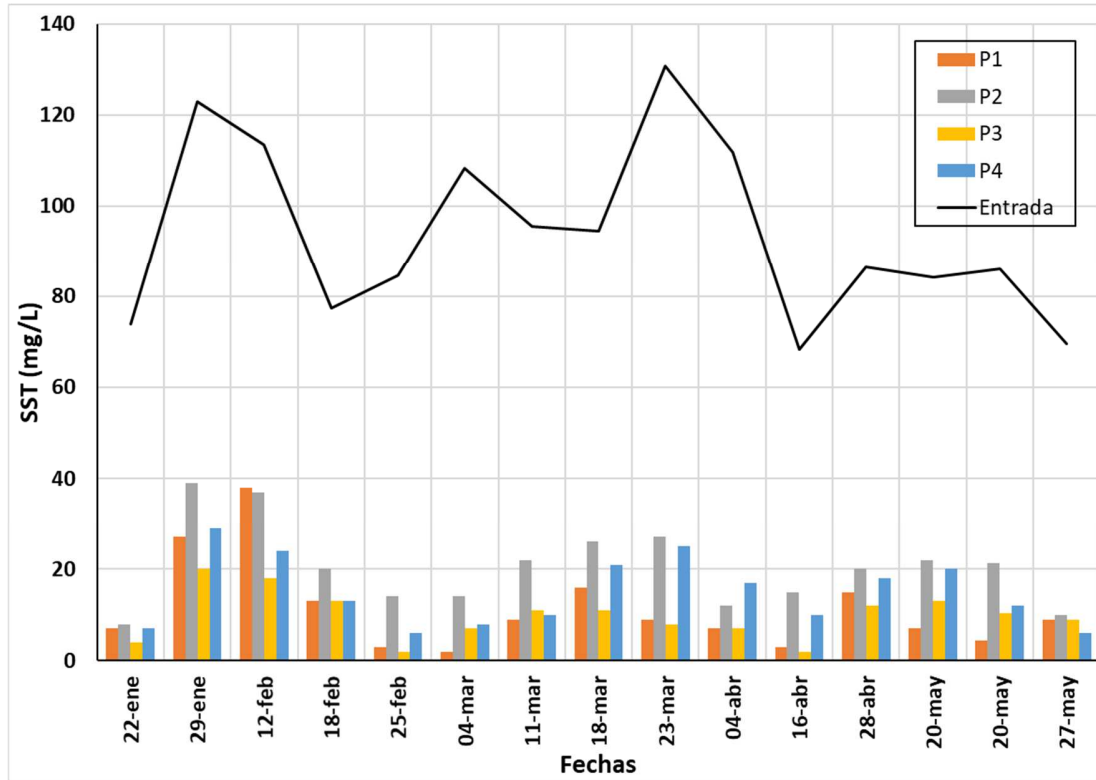
Tabla XXXVI. Resumen de resultados para SST en los pilotos MSL

Resumen	E	P1	P2	P3	P4
Número de resultados	15	15	15	15	15
Valor max (mg/L)	130.72	38	39	20	29
Valor min (mg/L)	68.4	2	8	2	6
SST prom (mg/L)	93.89	11.29	20.49	9.83	15.07
Desv est. SST (mg/L)	19.50	9.79	9.05	5.17	7.51
% remoción prom	-	88 %	78 %	90 %	84 %
Desv est. % rem	-	8 %	7 %	5 %	6 %

Fuente: elaboración propia.

³⁹ PERALTA, Ivis. *Composición típica de las aguas residuales domésticas crudas en Guatemala*. p.58.

Figura 29. Gráfico de SST para los pilotos MSL



Fuente: elaboración propia.

Los resultados muestran un promedio de SST de entrada a los pilotos de 94 mg/L. Este valor es creíble, ya que se tenían valores promedio cercanos a 230 mg/L de entrada en el agua cruda, por lo que el pretratamiento y el reactor anaerobio remueven cerca del 60 % de los sólidos suspendidos que ingresan.

Los pilotos MSL muestran eficiencias de remoción por encima del 75 %, lo cual se considera adecuado para obtener los resultados que se desean, ya que todos los valores de SST promedio de los efluentes cumplen con el límite de 50 mg/L que establece el RVRAR de Costa Rica.

Los resultados presentan suficiente consistencia a lo largo de los 5 meses en que se tomaron muestras, y una desviación estándar aceptable, por lo que se confirma la fiabilidad del sistema al ser utilizado como tratamiento secundario para remover SST. La figura 29 muestra que ninguna de las muestras superó el límite establecido en la legislación vigente.

Los resultados mostrados por los pilotos 1 y 3 son ligeramente mejores, aunque la diferencia respecto a P2 y P4 no es tan significativa como en otros parámetros de calidad medidos.

4.1.9. Fósforo

El fósforo se encuentra en las aguas residuales en la forma de fosfatos, donde las tres principales categorías son los ortofosfatos, polifosfatos y fosfatos orgánicos.

Debido a la imposibilidad para medir en el laboratorio el fósforo total en la mayoría de las muestras de este estudio, se midió la cantidad de ortofosfatos y se complementó con una prueba de fósforo total.

4.1.9.1. Fósforo reactivo

El fósforo reactivo es el fósforo contenido en los ortofosfatos.

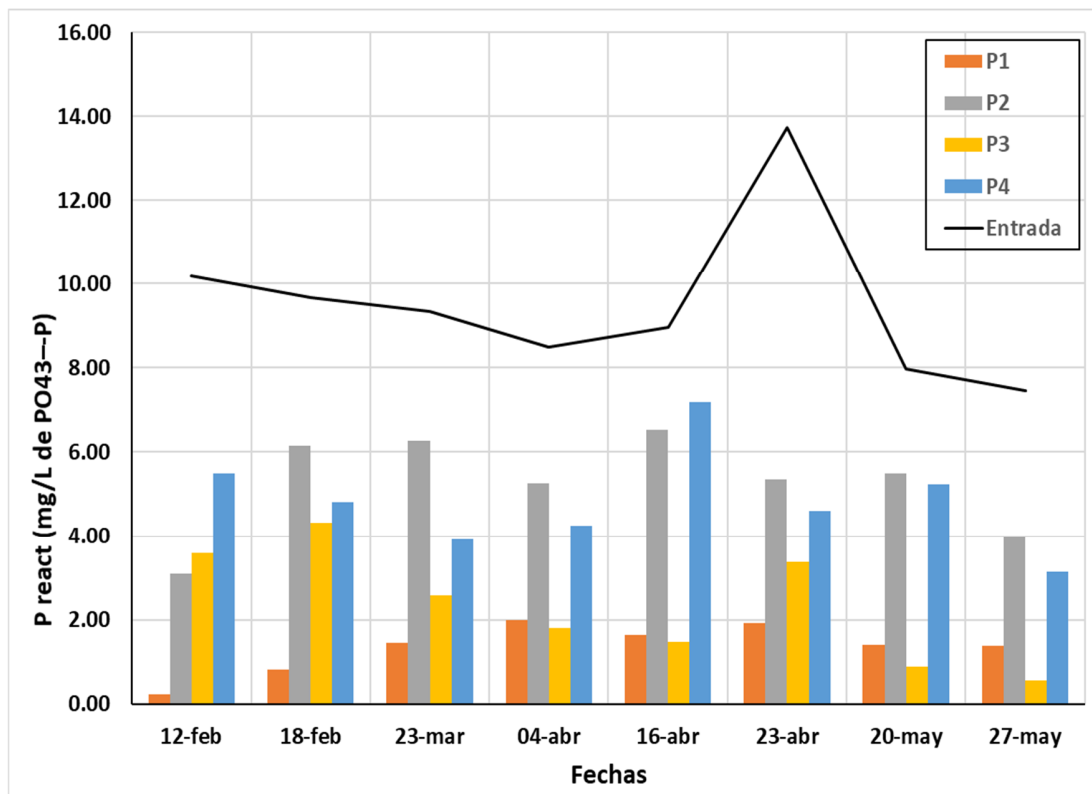
En la tabla XXXVII se presenta el resumen de los resultados de fósforo reactivo en la entrada y salida de los pilotos MSL, mientras que en la figura 30 se muestra la variación a lo largo del tiempo.

Tabla XXXVII. Resumen de resultados para P reactivo en los pilotos MSL

Parámetro	E	P1	P2	P3	P4
Número de resultados	8	8	8	8	8
Valor max (mg/L PO ₄ ³⁻ -P)	13.73	1.99	6.54	4.31	7.19
Valor min (mg/L PO ₄ ³⁻ -P)	7.45	0.23	3.10	0.56	3.14
Promedio (mg/L PO ₄ ³⁻ -P)	9.48	1.35	5.27	2.32	4.83
Desv est. P react (mg/L PO ₄ ³⁻ -P)	1.94	0.58	1.18	1.36	1.21
% remoción prom	-	85%	43%	76%	48%
Desv est. % rem	-	7%	15%	12%	15%

Fuente: elaboración propia.

Figura 30. Gráfico de P reactivo para los pilotos MSL



Fuente: elaboración propia.

Los pilotos 1 y 3 muestran eficiencias de remoción por encima del 75 %, mientras que los pilotos 2 y 4 presentan porcentajes de remoción cercanos al 45 %, por lo que se aprecia una diferencia significativa entre los pilotos que utilizan antracita como material permeable y los que utilizan grava.

No se tiene claro si esta diferencia se debe a que en los pilotos con antracita se da una mayor oxidación del hierro, o si los fosfatos que se unen con los hidróxidos de hierro o sus iones son mejor filtrados y adsorbidos en estos pilotos.

A pesar de que los ortofosfatos son solamente una parte de los fosfatos presentes en el agua, se trata de la forma más abundante en las aguas residuales domésticas, diversos autores indican que este fósforo reactivo representa:

- Entre el 60 y el 85 % del fósforo total⁴⁰.
- Según caracterización de aguas residuales domésticas, realizadas en un PTAR, en promedio, 5.9 mg/L de fósforo corresponden a fósforo reactivo, por cada 6.6 mg/L de fósforo total, es decir, un 89 %⁴¹.

Esta información indica que, a pesar de que no se cuentan con todos los resultados de fósforo total en el sistema, los resultados y eficiencia de remoción de fósforo reactivo corresponden una buena guía para intuir la capacidad de los pilotos para remover el fósforo total.

⁴⁰ BALI, Mahmoud y GUEDDARI, Moncef. *Removal of phosphorus from secondary effluents using infiltration-percolation process*. p.1.

⁴¹ GUIDA et al. *Demonstration of ion exchange technology for phosphorus removal and recovery from municipal wastewater*. p.83.

4.1.9.2. Fósforo total

Se tiene los resultados de fósforo total para una única muestra, la cual fue analizada en el Laboratorio Nacional de Aguas, el cual pertenece al AyA. En la tabla XXXVIII se muestran los resultados de dicho ensayo.

Tabla XXXVIII. **Resultados de P total para los pilotos MSL**

Muestra	En-trada	P1		P2		P3		P4	
		P total (mg/L)	% rem	P total (mg/L)	% rem	P total (mg/L)	% rem	P total (mg/L)	% rem
LNA	7.36	0.57	92 %	5.03	32 %	0.29	96 %	5.03	32 %

Fuente: elaboración propia.

Se aprecia que el comportamiento es similar al observado para los ensayos de fósforo reactivo, donde P1 y P3 presentan altos porcentajes de remoción (en este caso por encima del 92 %), mientras que P2 y P4 tienen eficiencias de remoción cercanas al 30 %.

El RVRAR de Costa Rica no establece valores límite para fósforo total en descargas de PTARs de aguas residuales ordinarias a cuerpos receptores, por lo que se decide consultar otros reglamentos de la región:

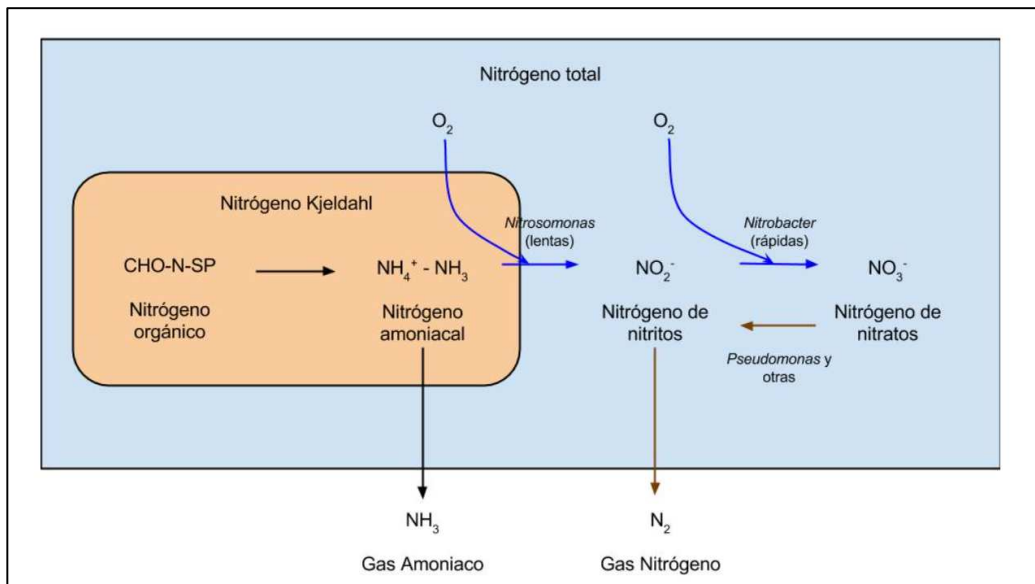
- En Guatemala y Nicaragua se establece un valor máximo de 10 mg/L
- En Honduras y Panamá indican un límite máximo de 5 mg/L

Por lo que los resultados obtenidos cumplirían en cualquiera de los países citados para el efluente de los pilotos 1 y 3, mientras que P2 y P4 se encuentran sumamente cerca de cumplir con la norma más estricta.

4.1.10. Nitrógeno

Según los procesos que se llevan a cabo para remover nitrógeno del agua residual, se espera un comportamiento similar al mostrado en la figura 31. En la cual se esquematiza el ciclo del nitrógeno para sistemas de tratamiento.

Figura 31. Esquema de ciclo del nitrógeno en aguas residuales



Fuente: MICROLAB INDUSTRIAL. *Las formas múltiples del Nitrógeno.*

<https://www.aguasresiduales.info/revista/blog/las-formas-multiples-del-nitrogeno>. Consulta: 7 de junio de 2021.

4.1.10.1. Nitrógeno amoniacal

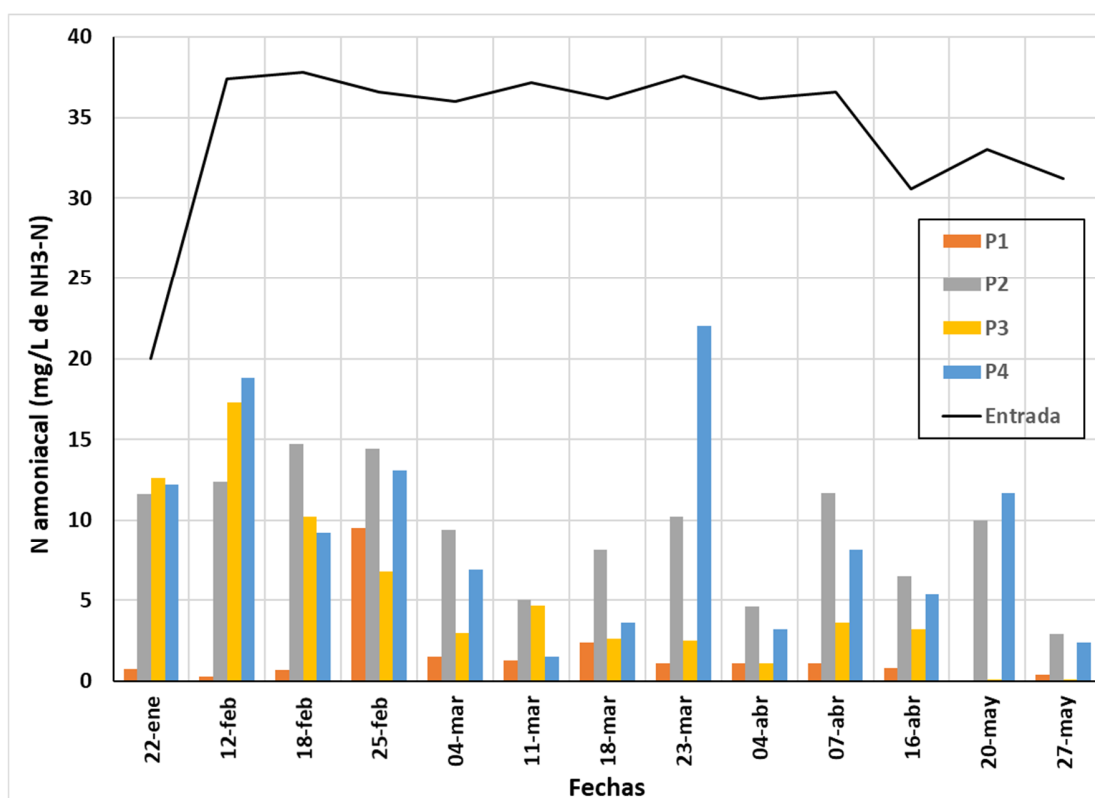
En la tabla XXXIX se presenta el resumen de los resultados de Nitrógeno amoniacal en la entrada y salida de los pilotos MSL, mientras que en la figura 32 se muestra la variación a lo largo del tiempo.

Tabla XXXIX. Resumen de resultados para N amoniacal en los pilotos MSL

Parámetro	E	P1	P2	P3	P4
Número de resultados	14	13	13	13	13
Valor max (mg/L de NH ₃ -N)	37.8	9.5	14.7	17.3	22
Valor min (mg/L de NH ₃ -N)	20	0.05	2.9	0.1	1.5
Promedio (mg/L de NH ₃ -N)	33.39	1.61	9.35	5.22	9.08
Desv est. N amon (mg/L de NH ₃ -N)	5.93	2.44	3.74	5.19	6.33
% remoción prom	-	95 %	72 %	84 %	73 %
Desv est. % rem	-	7 %	13 %	19 %	19 %

Fuente: elaboración propia.

Figura 32. Gráfico de N amoniacal para los pilotos MSL



Fuente: elaboración propia.

Los pilotos MSL muestran eficiencias de remoción por encima del 72 % para Nitrógeno amoniacal, lo cual en principio se considera como buen desempeño,

sin embargo, estos resultados deben ser complementados con información de nitrógeno total o nitrógeno Kjeldahl.

La remoción de nitrógeno amoniacal mostrada se considera valiosa, ya que este compuesto es sumamente nocivo para los cuerpos receptores y las formas de vida que habitan en ellos.

El piloto número 1 es el que muestra los mejores resultados de remoción, alcanzando un 95 %, y P2 se encuentra en segundo lugar. Por otro lado, P3 y P4 muestran una remoción muy similar, lo cual lleva a pensar que el tipo de suelo utilizado en los bloques no influye de manera significativa en este proceso.

La remoción de nitrógeno amoniacal se realiza en los filtros MSL por medio de nitrificación, por lo cual se debería dar un aumento en los nitritos y nitratos presentes en el agua. Sin embargo, este proceso ocurre en las capas superiores del sistema, en donde es imposible tomar muestras para medir los componentes mencionados.

En las capas superiores de los pilotos también se podría ver una variación debido a la conversión de nitrógeno orgánico en nitrógeno amoniacal, por parte de los microorganismos presentes.

4.1.10.2. Nitratos

Según lo mostrado en la figura 31, se espera que la concentración de nitratos se eleve considerablemente en las capas superiores del sistema, al realizarse el proceso de nitrificación. Posteriormente, se debería dar desnitrificación en las capas inferiores, reduciendo de nuevo la cantidad de nitratos.

Sin embargo, solamente es posible tomar muestras en la salida de los pilotos, por lo que resulta imposible evaluar las etapas intermedias de manera directa.

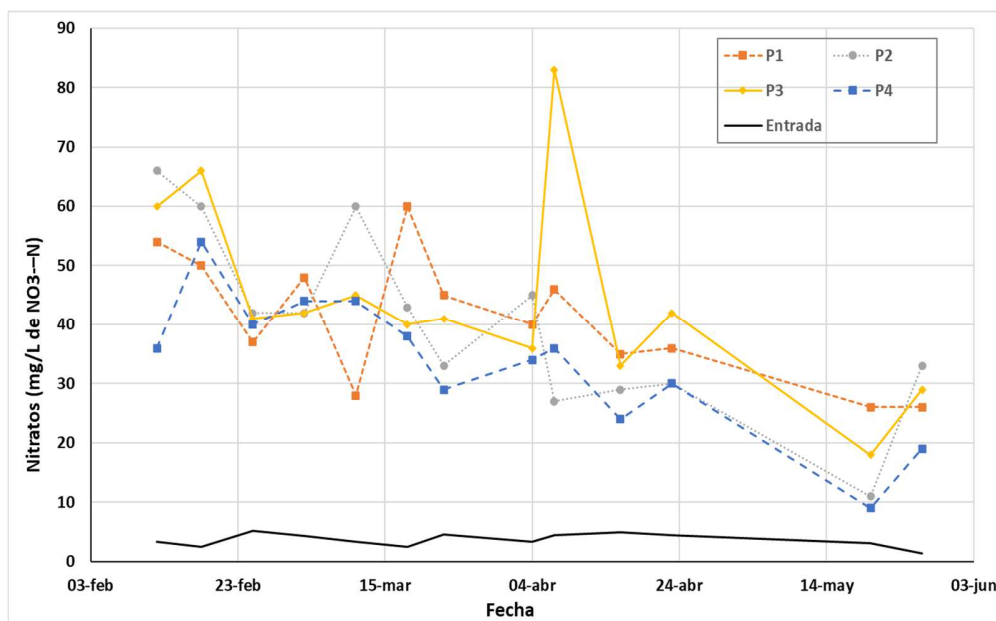
En la tabla XL se presenta el resumen de los resultados de nitratos en la entrada y salida de los pilotos MSL, mientras que en la figura 33 se muestra la variación a lo largo del tiempo.

Tabla XL. **Resumen de resultados para Nitratos en los pilotos MSL**

Parámetro	E	P1	P2	P3	P4
Número de resultados	13	13	13	13	13
Valor max (mg/L de NO ₃ ⁻ -N)	5.2	60	66	83	54
Valor min (mg/L de NO ₃ ⁻ -N)	1.4	26	11	18	9
Promedio (mg/L de NO ₃ ⁻ -N)	3.65	40.85	40.08	44.31	33.62
Desv estándar (mg/L de NO ₃ ⁻ -N)	1.11	10.79	15.40	16.80	11.72

Fuente: elaboración propia.

Figura 33. **Gráfico de Nitratos para los pilotos MSL**



Fuente: elaboración propia.

Se aprecia que existe un aumento significativo entre los valores de nitritos en la entrada y salida de los pilotos MSL. Esto indica que sí se está dando nitrificación en el sistema, lo cual coincide con los resultados en donde se muestra una disminución en el nitrógeno amoniacal.

Los valores observados también expresan que no se está realizando una desnitrificación completa, ya que esa condición bajaría los niveles de nitratos en el efluente.

Así mismo, en la figura 33 se aprecia una tendencia decreciente en los valores de nitratos a lo largo del tiempo. Al comparar esa tendencia con los resultados de nitrógeno amoniacal, los cuales se mantienen relativamente similares a lo largo de los 5 meses, se concluye que podría estar dándose una mejor desnitrificación en los sistemas conforme avanza su operación.

4.1.10.3. Nitritos

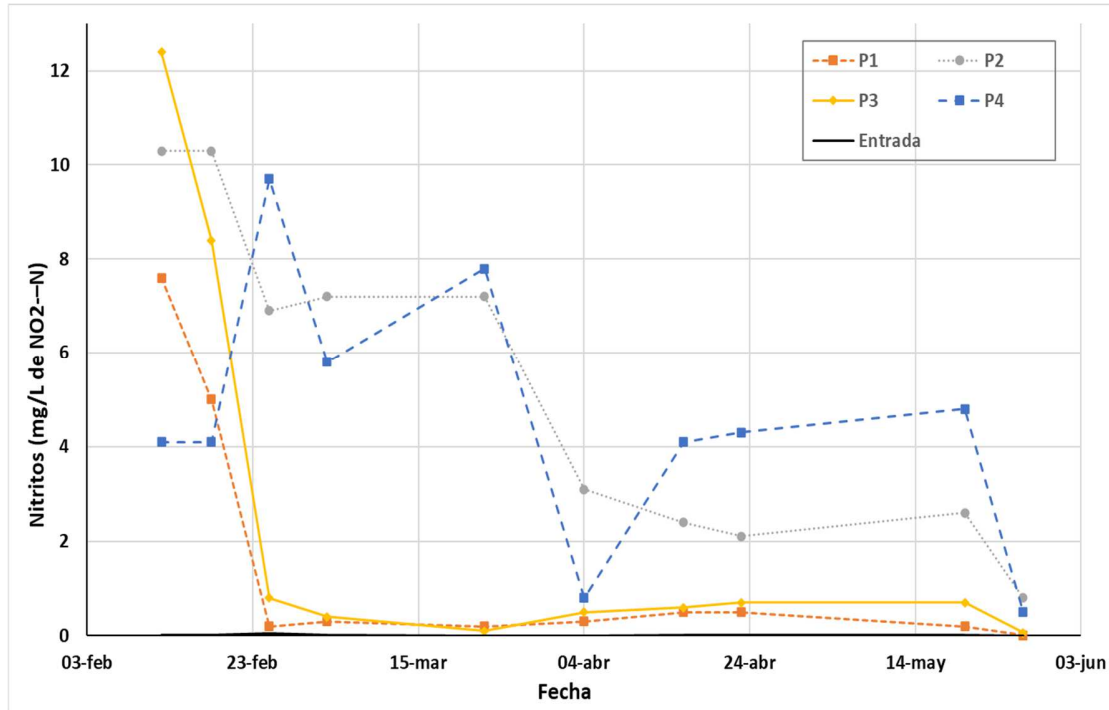
En la tabla XLI se presenta el resumen de los resultados de nitratos en la entrada y salida de los pilotos MSL, mientras que en la figura 34 se muestra la variación a lo largo del tiempo.

Tabla XLI. **Resumen de resultados para Nitritos en los pilotos MSL**

Parámetro	E	P1	P2	P3	P4
Número de resultados	10	10	10	10	10
Valor max (mg/L de NO ₂ ⁻ -N)	0.043	7.6	10.3	12.4	9.7
Valor min (mg/L de NO ₂ ⁻ -N)	0.002	0.01	0.2	0.06	0.5
Promedio (mg/L de NO ₂ ⁻ -N)	0.01	1.48	4.28	2.47	4.24
Desv estándar (mg/L de NO ₂ ⁻ -N)	0.01	2.62	3.36	4.29	3.07

Fuente: elaboración propia.

Figura 34. Gráfico de Nitritos para los pilotos MSL



Fuente: elaboración propia.

El comportamiento de los nitritos es similar al descrito para los nitratos, donde se da un aumento debido a la nitrificación y posteriormente un descenso debido a la desnitrificación.

Una vez más, solamente es posible tomar muestras en la salida de los pilotos, por lo que resulta imposible evaluar las etapas intermedias de manera directa.

Al igual que en el caso de nitratos, en la figura 34 se aprecia una tendencia decreciente en los valores de nitritos a lo largo del tiempo. Lo cual refuerza la idea de que podría estar dándose una mejor desnitrificación en los sistemas conforme avanza su operación.

4.1.10.4. Nitrógeno Kjeldahl

Se tiene los resultados de Nitrógeno Kjeldahl para una única muestra, la cual fue analizada en el Laboratorio Nacional de Aguas, el cual pertenece al AyA. En la tabla XLII se muestran los resultados de dicho ensayo.

Tabla XLII. Resultados para N Kjeldahl en los pilotos MSL

Mues- -tra	En- trada	P1		P2		P3		P4	
		N Kjeldahl (mg/L)	% rem	N Kjeldahl (mg/L)	% rem	N Kjeldahl (mg/L)	% rem	N Kjeldahl (mg/L)	% rem
LNA	73.92	0.84	99 %	21.03	72 %	<LD (0.13)	100 %	26.29	64 %

Fuente: elaboración propia.

Este parámetro se compone de la suma de nitrógeno orgánico y nitrógeno amoniacal, y se considera valioso debido a que aporta una visión más amplia de la remoción, ya que el nitrógeno orgánico se transforma con relativa facilidad en nitrógeno amoniacal, debido a la acción de los microorganismos.

Los resultados muestran una remoción mayor al 95 % para los pilotos 1 y 3, mientras que P2 y P4 muestran remociones cercanas al 60 %. Esto coincide con lo observado en los resultados de nitrógeno amoniacal, donde se da un remanente mayor en el efluente de los pilotos 2 y 4.

4.1.10.5. Nitrógeno total

Utilizando los resultados proporcionados por el Laboratorio Nacional de Aguas, se logra analizar el balance de nitrógeno a la entrada y la salida de los pilotos MSL, a pesar de que se trata de un análisis para una única fecha, se considera valioso para entender lo que ocurre a lo interno de los filtros.

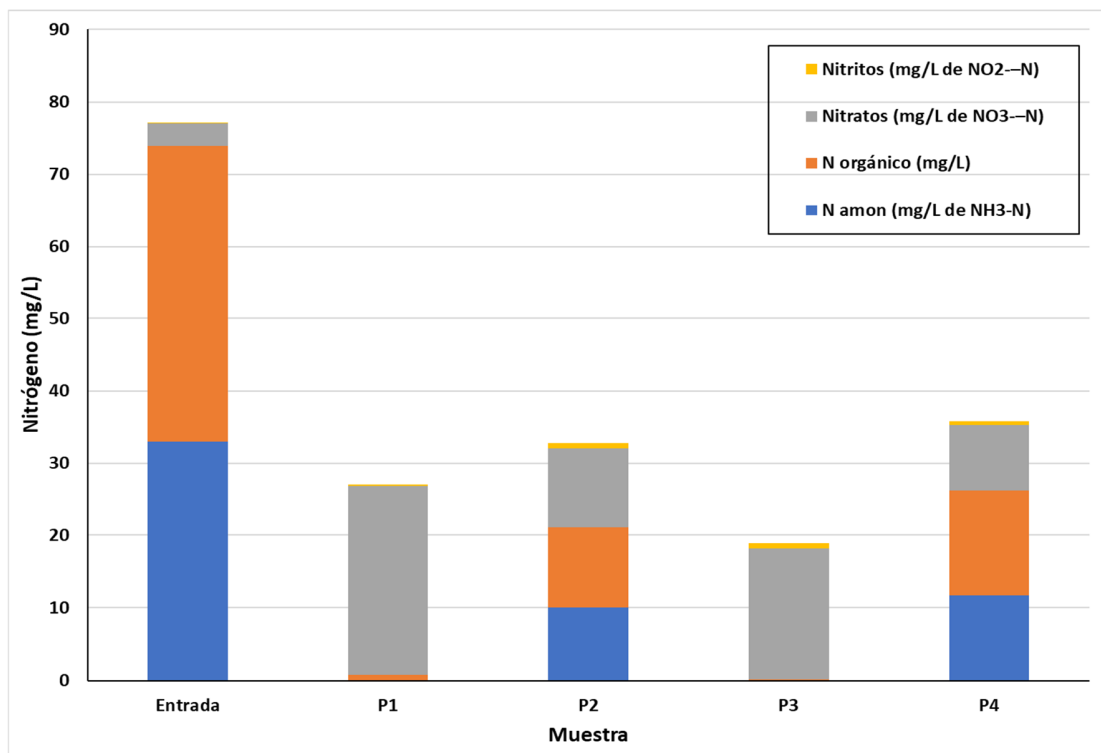
En la tabla XLIII se muestran los resultados del balance de nitrógeno total para el 20 de mayo de 2012, compuesto por nitrógeno amoniacal, nitrógeno orgánico, nitrógeno en nitritos y nitrógeno en nitratos. Así mismo, la Figura 35 muestra de manera esquemática el nitrógeno total y las partes que lo componen.

Tabla XLIII. **Resultados para N total en los pilotos MSL**

Muestra	N amon (mg/L de NH ₃ -N)	N Kjeldahl (mg/L)	N orgánico (mg/L)	Nitratos (mg/L de NO ₃ ⁻ -N)	Nitritos (mg/L de NO ₂ ⁻ -N)	N total (mg/L)	% rem
Entrada	33	73.92	40.92	3.1	0.019	77.039	-
P1	0.05	0.84	0.79	26	0.2	27.04	65 %
P2	10	21.03	11.03	11	0.8	32.83	57 %
P3	0.1	0.13	0.03	18	0.7	18.83	76 %
P4	11.7	26.28	14.58	9	0.5	35.79	54 %

Fuente: elaboración propia.

Figura 35. **Gráfico de Nitrógeno total para los pilotos MSL**



Fuente: elaboración propia.

Los porcentajes de remoción de nitrógeno total en los pilotos se encuentran por encima del 54 %. Se aprecia que, como se ha indicado para varios de los parámetros medidos en este estudio, P1 y P3 muestran mejores porcentajes de remoción, en este caso siendo P3 el que muestra mejores resultados.

Para el caso de P2 y P4, y con el fin de analizar su menor desempeño, se observa que no todo el nitrógeno orgánico se transformó en nitrógeno amoniacal, lo cual podría indicar menos cantidad o menos actividad de microorganismos que realizan este proceso. Adicionalmente, una parte considerable del nitrógeno amoniacal no se transformó en nitratos y nitritos, lo cual demuestra una menor eficiencia en la nitrificación.

Se aprecia también, que la mayoría del nitrógeno remanente en el efluente de P1 y P3 corresponde a nitratos, por lo que la desnitrificación es el proceso que está limitando una mayor remoción de nitrógeno total. Cabe resaltar que existe la posibilidad de que la antracita presente una mayor adsorción fisicoquímica de los iones de amonio, lo cual, en menor medida, puede aportar a la remoción de nitrógeno total. A esto se suma la posibilidad de que se libere gas Amoniaco durante la amonificación del nitrógeno orgánico.

Estos resultados son consecuentes con lo expresado por Sato et al. Para sus experimentos con filtros MSL, quienes indican:

Dado que la nitrificación fue satisfactoria en el Sistema MSL tanto bajo aireación como sin aireación, la desnitrificación fue el factor limitante para la eliminación de nitrógeno en este sistema MSL. Esto fue debido a la disponibilidad insuficiente de materia orgánica como donante de electrones⁴².

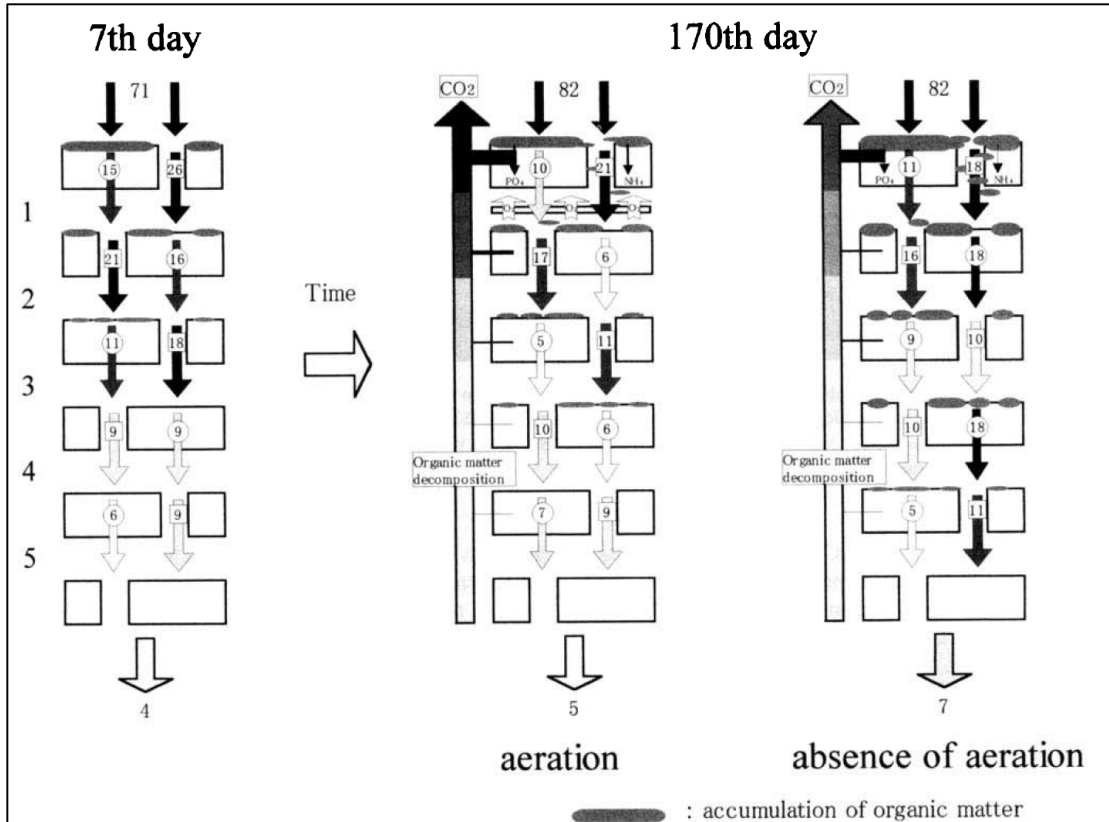
⁴² SATO et al. *Characterization of Treatment Processes and Mechanisms of COD, Phosphorus and Nitrogen Removal in a Multi-Soil-Layering System*. p.220

De esta manera, es altamente probable que los pilotos MSL del presente estudio presenten la desnitrificación como proceso limitante de la remoción de nitrógeno, ya que se da una remoción muy eficaz de la materia orgánica dentro de las primeras capas del filtro, lo cual impide el aporte de carbono como donante de electrones en las capas inferiores del sistema.

El aserrín y las bolsas de yute utilizadas en los bloques de suelo son materiales biodegradables que se espera que puedan funcionar como donantes de electrones al iniciar su degradación. Sin embargo, se estima que 5 meses de operación es un tiempo corto para iniciar la descomposición de estos.

Con esta información, es posible esperar que la desnitrificación mejorará a lo largo del tiempo en los sistemas MSL, conforme las capas superiores acumulen carga orgánica y sean menos eficientes removiendo DBO y DQO, por lo que más materia orgánica logrará llegar a capas inferiores de los filtros. Así mismo, la descomposición de aserrín y yute aumentará con el tiempo. Un esquema de esta situación en un experimento con un piloto MSL puede ser observado en la figura 36.

Figura 36. Esquema de acumulación de materia orgánica en capas de sistema MSL



Fuente: SATO *et al.* *Characterization of Treatment Processes and Mechanisms of COD, Phosphorus and Nitrogen Removal in a Multi-Soil-Layering System.* p.217.

Esta mejora esperada de la desnitrificación ya fue observada en los gráficos de la figura 33 y figura 34, donde se aprecia el descenso de nitritos y nitratos a la salida de los pilotos MSL.

El RVRAR de Costa Rica no establece valores límite para nitrógeno total en descargas de PTARs de aguas residuales ordinarias a cuerpos receptores, sin embargo, sí establece un límite máximo para descargas especiales provenientes de algunas actividades en particular. El valor establecido es de 50 mg/Lel cuál se cumple para todos los pilotos MSL de este estudio.

Se decide consultar otros reglamentos de la región que sí indiquen un valor máximo para aguas residuales ordinarias tratadas:

- En Honduras y Nicaragua se establece un valor máximo de 30 mg/L
- En Guatemala se indica un límite máximo de 20 mg/L
- En Panamá el valor máximo establecido es de 10 mg/L

Por lo que, para los resultados obtenidos, ninguno de los efluentes cumpliría la reglamentación en Panamá, P3 cumpliría en Guatemala y P1 y P3 cumplirían en Honduras y Nicaragua, mientras que P2 y P4 se encuentran cerca de cumplir con la norma en estos dos países.

Los resultados medidos para distintos tipos de nitrógeno en los sistemas son consistentes para los 5 meses de muestreo, lo cual lleva a pensar que este análisis de nitrógeno total puede ser utilizado como parámetro de lo que se esperaría para otras muestras de este estudio.

4.1.11. Turbiedad

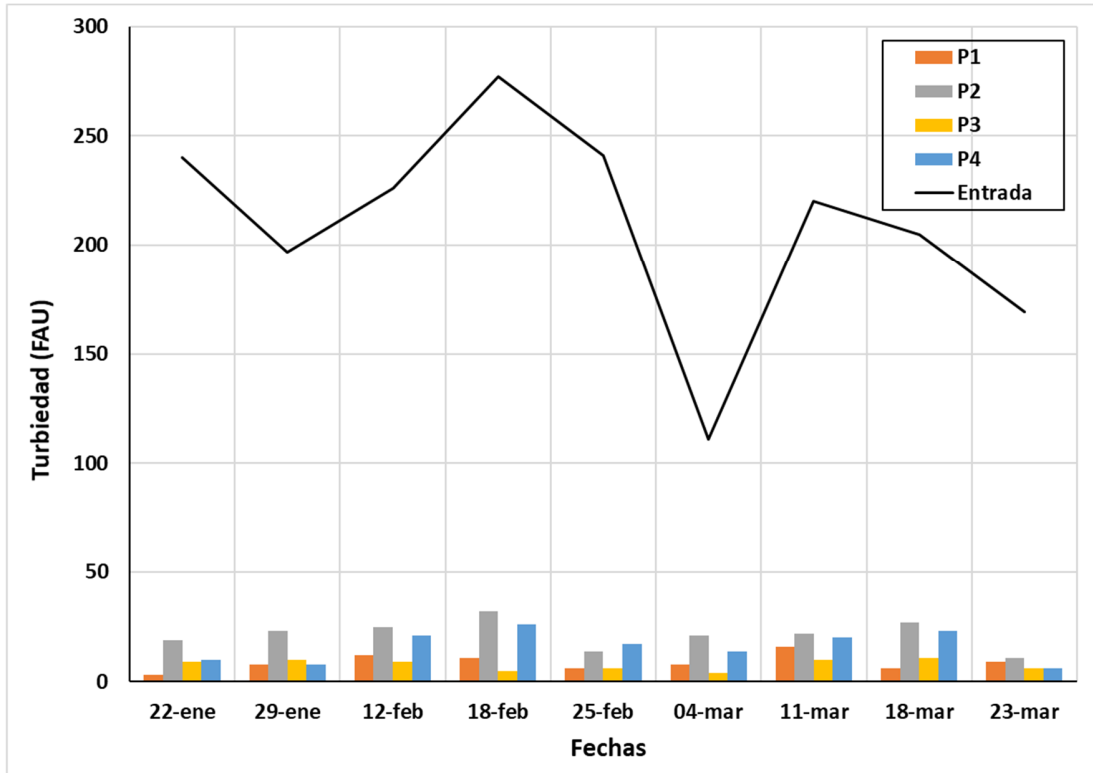
En la tabla XLIV se presenta el resumen de los resultados de turbiedad en la entrada y salida de los pilotos MSL, mientras que en la figura 37 se muestra la variación a lo largo del tiempo.

Tabla XLIV. **Resumen de resultados para turbiedad en los pilotos MSL**

Parámetro	Entrada	P1	P2	P3	P4
Número de resultados	9	9	9	9	9
Valor Turbiedad max (FAU)	277	16	32	11	26
Valor Turbiedad min (FAU)	111	3	11	4	6
Turbiedad Prom (FAU)	209.56	8.78	21.56	7.78	16.11
Desv estándar (FAU)	47.93	3.83	6.41	2.54	7.03

Fuente: elaboración propia.

Figura 37. Gráfico de turbiedad para los pilotos MSL



Fuente: elaboración propia.

La turbiedad no constituye un parámetro que sea regulado comúnmente para descargas de aguas residuales tratadas, sin embargo, impacta en los ecosistemas acuáticos por dispersar la luz solar y reducir la concentración de oxígeno. Afecta a la fotosíntesis, así como a la respiración y reproducción de los peces.

Los pilotos 1 y 3 muestran mejores resultados que los pilotos 2 y 4, lo cual se relaciona con el medio permeable elegido, como se ha discutido anteriormente. Con el fin de proveer un dato que pueda servir como parámetro de comparación, el Reglamento para la calidad del Agua Potable de Costa Rica establece que la turbiedad máxima debe ser de 5 UNT (equivalentes a FAU).

4.1.12. Color

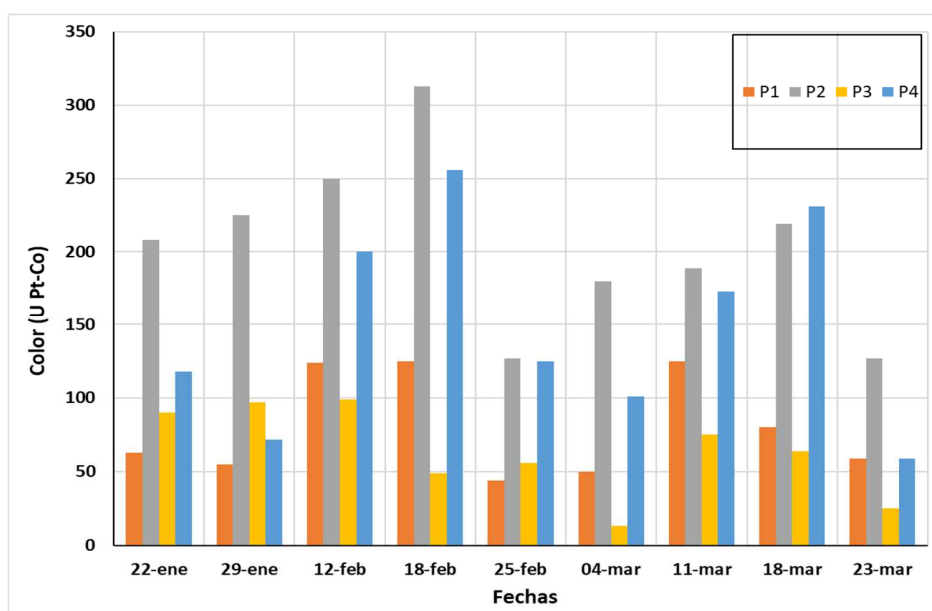
En la tabla XLV se presenta el resumen de los resultados de color aparente en la entrada y salida de los pilotos MSL, mientras que en la figura 38 se muestra la variación a lo largo del tiempo.

Tabla XLV. **Resumen de resultados para color aparente en los pilotos MSL**

Parámetro	P1	P2	P3	P4
Número de resultados	9	9	9	9
Valor Color max (U Pt-Co)	125	313	99	256
Valor Color min (U Pt-Co)	44	127	13	59
Color Prom (U Pt-Co)	80.56	204.22	63.11	148.33
Desv estándar (U Pt-Co)	34.52	58.46	30.65	70.01

Fuente: elaboración propia.

Figura 38. **Gráfico de color aparente para los pilotos MSL**



Fuente: elaboración propia.

Mediante los gráficos mostrados en la Figura 37 y Figura 38, el lector podrá darse una idea del aspecto que tiene el agua residual a la entrada y la salida de los pilotos MSL. Con el fin de proveer un dato que pueda servir como parámetro de comparación, el Reglamento para la calidad del Agua Potable de Costa Rica establece que el color aparente máximo debe ser de 15 U Pt-Co.

Una vez más, los pilotos 1 y 3 muestran mejores resultados que los pilotos 2 y 4, recalcando la diferencia que existe entre utilizar un medio permeable u otro.

4.1.13. Sustancias activas al azul de metileno

Se tiene los resultados de sustancias activas al azul de metileno para una única muestra, la cual fue analizada en el Laboratorio Nacional de Aguas, el cual pertenece al AyA. En la tabla XLVI se muestran los resultados de dicho ensayo.

Tabla XLVI. Resultados para SAAM en los pilotos MSL

Mues- tra	En- trada	P1		P2		P3		P4	
		SAAM (mg/L)	% rem	SAAM (mg/L)	% rem	SAAM (mg/L)	% rem	SAAM (mg/L)	% rem
LNA	3.82	<LD (0.6)	84 %	2.27	41 %	<LD (0.37)	90 %	4.02	-5%

Fuente: elaboración propia.

Los pilotos MSL muestran eficiencias de remoción distintas, con P1 y P3 con porcentajes de remoción superiores al 84 %, lo cual se considera satisfactorio.

Todos los valores de SAAM promedio de los efluentes cumplen con el límite de 5 mg/L que establece el RVRAR de Costa Rica. Sin embargo, el agua a la salida del RAFA ya cumplía con este valor.

4.2. Comparación de parámetros con estudios previos en sistemas MSL

Según los resultados expuestos anteriormente, es posible comparar algunos valores obtenidos en este estudio con los que presenta la literatura de sistemas MSL.

4.2.1. Comparación de parámetros del agua de entrada

La tabla XLVII muestra los valores mínimos, máximos y promedio de los principales parámetros de calidad del agua de entrada a los sistemas, así como el rango de valores encontrado en la literatura.

Tabla XLVII. **Comparación de parámetros de calidad del agua de entrada a los pilotos MSL**

Dato	DBO	DQO	SST	N total	P total
Valor max (mg/L)	234.55	434.60	130.72	-	-
Valor min (mg/L)	93.00	217.50	68.40	-	-
Valor prom (mg/L)	155.01	288.89	93.89	77.04	7.36
Rango literatura (mg/L)	32 a 378	43 a 504	27 a 842	30 a 93	3 a 17

Fuente: elaboración propia, adaptado de MASUNAGA *et al.* *Characteristics of wastewater treatment using a multi-soil-layering system in relation to wastewater contamination levels and hydraulic loading rates.* p.219, y DESHPANDE *et al.* *Experimental Investigation of Treatment of Domestic Wastewater Using Multi Soil Layering (MSL) System.* p.6.

Se aprecia que todos los valores del agua de entrada utilizada durante este estudio se encuentran dentro del rango de valores indicado por la literatura de sistemas MSL.

4.2.2. Comparación de cargas hidráulicas en los pilotos MSL

An *et al.* realizaron una recopilación de numerosos experimentos realizados con distintas tasas de carga hidráulica superficial (ver anexo 2), de ahí se desprende que⁴³

- Se han realizado pruebas con cargas hidráulicas superficiales que van desde los 200 hasta los 4000 L/m² día.
- Se considera que el sistema puede operar adecuadamente en el rango de 200 hasta 1000 L/m² día.
- En términos generales, se aprecia mayores porcentajes de remoción para cargas hidráulicas menores a 600 L/m² día.

En la tabla XXIX se aprecia que los valores promedio de carga hidráulica superficial en los pilotos MSL del presente estudio se encuentran debajo de los 600 L/m² día. Así mismo, nunca se obtuvieron valores menores que 200 ni mayores que 1000 L/m² día.

4.2.3. Comparación de eficiencias de remoción mostradas

Se muestra la comparación de eficiencia de remoción para los principales parámetros de calidad del agua residual:

- Eficiencia de remoción de DBO
 - La literatura muestra porcentajes de remoción para DBO desde 52.6 hasta 99.8 %.

⁴³ AN *et al.* *Multi-Soil-Layering Systems for Wastewater Treatment in Small and Remote Communities.* p.138

- En el presente estudio, los pilotos MSL P1, P2, P3 y P4 alcanzaron eficiencias de remoción de DBO de 90 %, 78 %, 88 % y 78 %, respectivamente.
- Eficiencia de remoción de DQO
 - La literatura muestra porcentajes de remoción para DQO desde 22.9 hasta 98.1 %.
 - En el presente estudio, los pilotos MSL P1, P2, P3 y P4 alcanzaron eficiencias de remoción de DQO de 83 %, 76 %, 82 % y 78 %, respectivamente.
- Eficiencia de remoción de Sólidos Suspendidos Totales
 - La literatura muestra porcentajes de remoción para SST desde 32.4 hasta 97.2 %.
 - En el presente estudio, los pilotos MSL P1, P2, P3 y P4 alcanzaron eficiencias de remoción de SST de 88 %, 78 %, 90 % y 84 %, respectivamente.
- Eficiencia de remoción de Nitrógeno Total
 - La literatura muestra porcentajes de remoción para N total desde 22 hasta 99.7 %.
 - En el presente estudio, los pilotos MSL P1, P2, P3 y P4 alcanzaron eficiencias de remoción de Nitrógeno total de 65 %, 57 %, 76 % y 54 %, respectivamente.
- Eficiencia de remoción de Fósforo Total
 - La literatura muestra porcentajes de remoción para P total desde 26.1 hasta 99.1 %.
 - En el presente estudio, los pilotos MSL P1, P2, P3 y P4 alcanzaron eficiencias de remoción de Fósforo total de 92 %, 32 %, 96 % y 32 %, respectivamente.

Por lo que se aprecia que todos los valores de remoción obtenidos se encuentran dentro de los rangos observados anteriormente en investigaciones realizadas en otros países.

Así mismo, vale la pena resaltar que los resultados de remoción obtenidos al utilizar antracita como material permeable en los pilotos son considerablemente mejores que aquellos obtenidos al utilizar grava.

Esta mejor remoción obtenida mediante el uso de pilotos con antracita ofrece resultados similares a los de estudios que utilizaron zeolita para sus sistemas MSL.

Este comportamiento es esperable, ya que tanto la antracita como la zeolita cuentan con un área superficial y porosidad altas, lo cual permite la proliferación de microorganismos y la mayor probabilidad de adsorción y filtración de los contaminantes.

4.3. Discusión estimación de costos

Para realizar las estimaciones y comparaciones contenidas en esta sección del documento, se utilizan colones costarricenses, con un tipo de cambio de 614 colones por cada dólar estadounidense, a la fecha de junio 2021.

4.3.1. Costos de construcción

Con el fin de tener un punto de comparación, se toman datos del proyecto para construcción de PTAR en una Urbanización en Heredia de Costa Rica, para una comunidad cuyo operador es una ASADA.

Se consideran casos comparables, ya que esta PTAR cuenta con el mismo caudal de diseño (72 m³/día) que la planta MSL propuesta para 100 casas en este estudio. Adicionalmente, se trata de un sistema que también consideró las capacidades de operación y mantenimiento de una PTAR operada por ASADA, así como la capacidad de pago de los habitantes de esta urbanización de bien social.

La PTAR que se utiliza para la comparación se trata de un sistema que utiliza reactor anaeróbico de flujo ascendente, seguido de filtro anaeróbico de flujo ascendente, y, por último, un pequeño tanque de aireación. La comparación se puede observar en la tabla XLVIII.

Tabla XLVIII. Comparación de costos de construcción para PTAR MSL y otra PTAR

Rubro	PTAR RAFA+FAFA+ T.Aireación	PTAR RAFA+MSL
Costo construcción	₪ 442,251,920.00	₪ 137,205,668.00
Área requerida (m ²)	155	225

Fuente: elaboración propia.

La tabla comparativa muestra que la PTAR propuesta de RAFA+MSL se puede construir con un 31 % del costo de la otra PTAR. Por lo que la PTAR propuesta con sistema MSL resultaría 69 % más barato y ocuparía un 42 % más de área.

4.3.2. Costos de operación y mantenimiento

Para obtener valores de referencia para el presente estudio, se recopilaron costos mensuales indicados en el manual operación y mantenimiento de cuatro plantas de tratamiento destinadas a proyectos de bien social, en comunidades

operadas por ASADAS, y que cuentan con distintas tecnologías para el tratamiento de aguas residuales.

La PTAR 1 utiliza un reactor de Biomasa Fija en lecho móvil (MBBR por sus siglas en inglés), y la PTAR 2 corresponde a un sistema de lodos activados de aireación extendida (LAAE). Por otro lado, la PTAR 3 funciona mediante un Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente (FAFA), mientras que la PTAR 4 es un sistema compuesto por un tanque séptico y un humedal de flujo subsuperficial horizontal (TS+HFSSH).

En la tabla XLIX se aprecia un resumen de las plantas de tratamiento analizadas, en donde también se evidencia que la población atendida es relativamente similar para las cinco urbanizaciones.

Tabla XLIX. **Comparación de costos mensuales de O y M para diferentes PTAR**

PTAR	Ubicación	Tecnología tratamiento	Costos mensuales OyM	Cantidad de casas	Costo mensual por casa
PTAR 1	Heredia	MBBR	¢2,903,194.62	156	¢18,610.22
PTAR 2	Heredia	LAAE	¢1,508,806.76	91	¢16,580.29
PTAR 3	Guanacaste	FAFA	¢836,476.76	168	¢4,979.03
PTAR 4	Puntarenas	TS+HFSSH	¢668,228.48	143	¢4,672.93
PTAR MSL	-	RAFA+MSL	¢618,132.22	100	¢6,181.32

Fuente: elaboración propia, adaptado de AyA, *Manuales de operación y mantenimiento de PTAR en ASADAS, Subgerencia de Sistemas Delegados*.

Se tiene que el sistema de RAFA+MSL se encuentra en la parte central en términos de costos por casa, aunque se acerca mucho más a los valores bajos que a los altos, que son de tres veces el costo para el sistema MSL.

Vale la pena recordar que se trata de sistemas pequeños, los cuales no permiten aprovechar la economía de escala que todas las tecnologías de

depuración de aguas ofrecen⁴⁴. Esto hace que el costo por vivienda se incremente respecto a otros sistemas más grandes.

No obstante, las poblaciones rurales suelen ser pequeñas y presentar dispersión en sus viviendas, por lo que se dificulta la instalación de sistemas centralizados para numerosas viviendas.

4.3.3. Tarifa estimada y tarifas existentes

Para analizar la tarifa estimada para el sistema propuesto con tecnología MSL, se asumirá que la PTAR es construida por el estado o donada por otra entidad, ya que se trata de la condición más común en el caso de poblaciones rurales. Entonces, el costo mensual aproximado por vivienda es de ₡6,182.

La Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos (ARESEP) es la entidad encargada de aprobar las tarifas de servicios en Costa Rica, por lo que se consulta su página web para comparar las tarifas aprobadas vigentes para servicio de alcantarillado y tratamiento.

Estas tarifas se cobran con base en el consumo medido de agua potable, por lo que se retoman los valores utilizados al estimar el caudal de diseño de la PTAR propuesta.

- Hacinamiento: 4 personas/vivienda
- Dotación agua potable: 225 L/hab-día

⁴⁴ CENTENO, Erick y MURILLO, Adrián. *Comparación de tecnologías para el tratamiento sostenible de aguas residuales ordinarias en pequeñas comunidades de Costa Rica*. p.21.

Con estos datos se tiene que el consumo promedio mensual por vivienda sería de 27 m³. Para este valor se realiza una comparación de tarifas en la Tabla L. Algunas de las tarifas cuentan con cargos fijos mensuales o cálculos escalonados según el consumo.

Tabla L. **Comparación de tarifas aprobadas en Costa Rica para alcantarillado**

Operador	Cargo fijo	Bloque 1 a 16 m ³	Bloque 16 a 26 m ³	Bloque 26 a 27 m ³	Consumo promedio vivienda (m ³ /mes)	Tarifa mensual estimada
AyA	₡1,200.00	₡391.00	₡356.00	₡850.00	27	₡11,866.00
ASADA Tobosi	-		₡705.00		27	₡19,035.00
ASADA L. Zurquí	-		₡337.00		27	₡9,099.00
ASADA P. Garzas	-		₡440.00		27	₡11,880.00
ESPH	₡600.00	₡214.00	₡256.00	₡391.00	27	₡6,975.00
Promedio	-	-	-	-	-	₡11,771.00

Nota: la tarifa de Lomas de Zurquí y Paso Garzas no se ha actualizado desde el año 2011.

Fuente: elaboración propia, adaptado de ARESEP. *Tarifas aprobadas para alcantarillado y tratamiento de aguas residuales*. <https://aresep.go.cr/alcantarillado/tarifas>. Consulta: 7 de junio de 2021.

Se observa que todas las tarifas comparadas se encuentran por encima de la tarifa estimada para la PTAR propuesta con sistema MSL ₡6,182 por vivienda por mes).

Se debe considerar que los métodos de estimación tarifaria de ARESEP pueden ser distintos y más complejos que los utilizados en este estudio. A pesar de esto, e incluso si la tarifa estimada para un sistema de este tipo fuera mayor con otro método de cálculo, se estima que estaría dentro del espectro bajo de las tarifas aprobadas en el país para servicios de alcantarillado y tratamiento de aguas residuales.

4.3.4. Capacidad de pago

Para determinar la capacidad de pago del servicio de alcantarillado y tratamiento de agua residual, para una familia en una comunidad rural en Costa Rica, para la PTAR con sistema MSL propuesta, se acude a datos del INEC acerca de ingresos y gastos en zonas rurales.

La tabla LI muestra los ingresos mensuales por hogar en Costa Rica para zonas urbanas y rurales, mientras que la tabla LII muestra los gastos mensuales por hogar en Costa Rica para zonas urbanas y rurales.

Tabla LI. **Ingresos mensuales por hogar según zona en Costa Rica**

Fuente de ingreso (en colones costarricenses)	2019		2020	
	Urbana	Rural	Urbana	Rural
Ingreso promedio por hogar	1 144 191	679 680	987 435	640 997
Ingreso por trabajo	913 725	558 481	735 786	487 958
Ingreso por salario	735 405	425 080	628 227	381 246
Ingreso autónomo	178 320	133 401	107 559	106 712
Ingreso renta de la propiedad	66 000	26 512	47 579	22 963
Subsidios estatales y becas	15 216	27 052	42 691	57 356
Otras transferencias	149 250	67 635	161 379	72 720

Fuente: elaboración propia, adaptado de INEC. *Encuesta Nacional de Hogares, 2019 y 2020*. <https://www.inec.cr/encuestas/encuesta-nacional-de-ingresos-y-gastos-de-los-hogares>.

Consulta: 7 de junio de 2021.

Tabla LII. **Gastos mensuales por hogar según zona en Costa Rica**

Grupo de gasto	Gasto en colones		
	Total	Urbana	Rural
Gasto de consumo del hogar	579 148	644 096	421 783
Alimentos y bebidas no alcohólicas	138 098	145 976	119 009
Bebidas alcohólicas, tabaco y estupefacientes	3 173	3 802	1 652
Prendas de vestir y calzado	26 296	29 382	18 818
Vivienda, agua, electricidad, gas y otros combustibles	69 715	80 332	43 990
Muebles y artículos para el hogar y conservación	33 450	37 947	22 554
Salud	32 179	36 958	20 601
Transporte	90 195	96 588	74 705
Comunicaciones	36 068	40 995	24 129
Recreación y cultura	37 457	42 838	24 419
Educación	27 775	34 437	11 631
Restaurantes y hoteles	41 771	46 357	30 660
Bienes y servicios diversos	42 971	48 484	29 615

Fuente: elaboración propia, adaptado de INEC. *Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares, 2018*. <https://www.inec.cr/encuestas/encuesta-nacional-de-ingresos-y-gastos-de-los-hogares>. Consulta: 7 de junio de 2021.

Por lo tanto, se tiene que un hogar promedio en zona rural cuenta con ingresos cercanos a los ₡641,000, por lo que la tarifa estimada de ₡6,182 representaría un 0.95 % de los ingresos netos del hogar, lo cual se considera razonable.

Así mismo, un hogar promedio en zona rural realiza un gasto mensual de ₡44,000 en servicios como agua, electricidad y otros combustibles, por lo que la tarifa estimada de ₡6182 representaría un 14 % del gasto usual actual en esta categoría.

Sin embargo, se debe considerar que la mayoría de las zonas rurales en Costa Rica no cuentan con servicio de alcantarillado y tratamiento de aguas residuales, por lo que el gasto promedio no contempla este tipo de servicio.

CONCLUSIONES

1. El efluente del sistema MSL, utilizado como tratamiento secundario de aguas residuales domésticas en una comunidad, logró porcentajes de remoción de al menos 75 % para DBO, DQO, SST, de al menos 50 % para Nitrógeno total y de al menos 30 % para Fósforo total. Sin embargo, estos parámetros son considerablemente mejores en los pilotos que utilizan antracita como material permeable.
2. El efluente de los 4 pilotos MSL utilizados en este estudio cumplió con los límites establecidos en el Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales de Costa Rica. Por lo que se considera que es una opción aplicable para tratamiento de agua en este país.
3. El costo aproximado de construir una PTAR, que incluya RAFA y Filtros MSL en una comunidad rural de Costa Rica, puede alcanzar valores hasta 60 % menores en comparación con otras tecnologías utilizadas en zonas rurales.
4. El costo estimado de la tarifa mensual para cada una de las 100 viviendas que reciban el servicio de tratamiento de agua mediante una PTAR que incluye sistema MSL corresponde a un 0.95 % de los ingresos netos de un hogar promedio en zona rural costarricense.
5. Se considera viable, desde el punto de vista económico, la utilización de plantas de tratamiento que incluyan sistema MSL, para atender poblaciones rurales pequeñas o medianas en Costa Rica.

RECOMENDACIONES

1. Realizar una investigación con sistemas MSL como tratamiento secundario y su comportamiento en el mediano y largo plazo, de manera que se determinen los cambios en su eficiencia o los problemas de colmatación que se puedan generar.
2. Probar sistemas MSL con material permeable distinto a la grava y antracita, o bien, con grava de un tamaño característico distinto.
3. Construir y probar un filtro MSL que utilice capas de antracita y de grava en diferentes secciones, de manera que se logre abaratar costos y aprovechar las ventajas de cada material permeable.
4. Probar sistemas MSL que contengan una fracción de materiales más biodegradables que el aserrín, con el fin de evaluar si se da una mejora en la remoción de nitrógeno total.
5. Investigar acerca de la viabilidad social de implementar un sistema MSL en una población rural cuyos servicios de agua son administrados de forma comunal.
6. Realizar investigaciones acerca de la viabilidad de implementar un sistema MSL en otros países de la región.
7. Probar un filtro MSL a mayor escala, con el efluente de una o varias viviendas.

BIBLIOGRAFÍA

1. AEMA. *Eliminación del nitrógeno en las aguas residuales*. [en línea] <<https://www.iagua.es/noticias/aema/eliminacion-nitrogeno-aguas-residuales>> [Consulta: 2 de junio de 2021.]
2. ALONZO, Andy. *Suelo y PET como tratamiento secundario de aguas residuales domésticas*. Trabajo de graduación de Maestría. Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2016. 156 pp.
3. AN, Chungiang; MCBEAN, Edward; HUANG, Gordon; YAO, Yiyu., ZHANG, Peng; CHEN, Xiujuan; LI, Yongping. Multi-Soil-Layering Systems for Wastewater Treatment in Small and Remote Communities. *Journal of Environmental Informatics*. [en línea]. <<https://doi.org/10.3808/jei.201500328>> [Consulta: 2 de junio de 2021].
4. BAIRD, Rodger; RICE, Eugene; EATON, Andrew; BRIDGEWATER, Laura., y WATER ENVIRONMENT FEDERATION. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. Estados Unidos: American Public Health Association, 2017. 298. pp.
5. BALI, Mahmoud y GUEDDARI, Moncef. Removal of phosphorus from secondary effluents using infiltration–percolation process. *Applied Water Science*. [en línea] <<https://doi.org/10.1007/s13201-019-0945-5>> [Consulta: 9 de junio 2021].

6. BRICEÑO, Nancy. *Fundamentos para el manejo de aguas residuales*. Costa Rica: Ministerio de Ambiente y Energía. 105 pp.
7. CENTENO, Erick y MURILLO, Adrián. Comparación de tecnologías para el tratamiento sostenible de aguas residuales ordinarias en pequeñas comunidades de Costa Rica. *Revista Ingeniería*. [en línea]. <<https://doi.org/10.15517/riv30i1.38898>> [Consulta: 10 de abril 2021]
8. COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA. *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Libro 31. Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Zonas Rurales, Periurbanas y Desarrollos Ecoturísticos*. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2019. 156 pp.
9. COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA. *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Libro 36. Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Tratamientos no Convencionales*. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2019. 175 pp.
10. CHEN, Xin, LUO, An Cheng, SATO, Kuniaki, WAKATSUKI, Toshiyuki, y MASUNAGA, Ttsugiyuki. An introduction of a multi-soil-layering system: a novel green technology for wastewater treatment in rural areas. *Water and Environment Journal*. [en línea] <<https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.2008.00143.x>> [Consulta: 3 de junio de 2021].
11. CRUZ, Nathalie. *Reporte operacional PTAR Urbanización Los Cenízaros*. Costa Rica: Consultoría SyC Ambiental, 2018. 200 pp.

12. DESHPANDE, Vaishnavi y THORVAT, Akshay. Experimental Investigation of Treatment of Domestic Wastewater Using Multi Soil Layering (MSL) System. *Aquademia: Water, Environment and Technology*. [en línea] <<https://doi.org/10.20897/awet/3963>> [Consulta: 12 de marzo de 2021].
13. GUIDA, Samuela, RUBERTELLI, Giorgia, JEFFERSON, Bruce y SOARES, Ana. Demonstration of ion exchange technology for phosphorus removal and recovery from municipal wastewater. *Chemical Engineering Journal*. [en línea] <<https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.129913>> [Consulta 6 de febrero de 2021].
14. HO, Chia-Chun., y WANG, Pei-Hao. Efficiency of a Multi-Soil-Layering System on Wastewater Treatment Using Environment-Friendly Filter Materials. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. [en línea] <<https://doi.org/10.3390/ijerph120303362>> [Consulta 20 de junio de 2021].
15. INEC. *Costo per cápita mensual de la canasta básica alimentaria (CBA)*. [en línea] <<https://www.inec.cr/documento/censo-2011-indicadores-de-tenencia-estado-y-hacinamiento-de-la-vivienda-segun-provincia>> [Consulta: 9 de junio de 2021].
16. INEC. *Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares 2018*. [en línea] <<https://www.inec.cr/sites/default/files/documentos-biblioteca-virtual/reenigh2018v2.pdf>> [Consulta: 9 de junio de 2021].

17. INEC. *Encuesta Nacional de Hogares 2017*. [en línea] <<https://www.inec.cr/multimedia/encuesta-nacional-de-hogares-2017>> [Consulta: 9 de marzo de 2021].
18. INEC. (2015). *Encuesta Nacional de Hogares 2015*. [en línea] <<https://www.inec.cr/multimedia/encuesta-nacional-de-hogares-2015>> [Consulta: 9 de marzo de 2020].
19. INEC. *Resultados Generales: Censo Nacional 2011*. [en línea] 2017. <<https://www.inec.cr/documento/censo-2011-resultados-generales-censo-2011>> [Consulta: 9 de junio de 2020].
20. LAMZOURI, K., MAHI, M., OUATAR, S., BARTALI, E., MASUNAGA, T., LATRACH, L. y MANDI, L. Application of Multi-soil-layering technique for wastewater treatment in Moroccan rural areas: study of the operation process for an engineering design. *Journal of Materials and Environmental Science*. [en línea] <<https://www.researchgate.net/publication/29807615>> [Consulta: 9 de junio de 2020].
21. LATRACH, Labib., MASUNAGA, Tsugiyuki., OUAZZANI, Naaila, HEJJAJ, Abdessamed, MAHI, Mustapha., y MANDI, Laila. Removal of bacterial indicators and pathogens from domestic wastewater by the multi-soil-layering (MSL) system. *Soil Science and Plant Nutrition*, [en línea] <<https://doi.org/10.1080/00380768.2014.974480>> [Consulta: 9 de junio de 2020].
22. OUAZZANI, Naaila., HEJJAJ, Abdessamed, ZOUHIR, Fouad., MAHI, Mustapha, MASUNAGA, Tsugiyuki y MANDI, Laila. Optimization of

- hydraulic efficiency and wastewater treatment performances using a new design of vertical flow Multi-Soil-Layering (MSL) technology. *Ecological Engineering*. [en línea] <<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.04.003>> [Consulta: 5 de febrero de 2020].
23. LOOMIS, George. *Soil Based Wastewater Treatment*. [en línea] <<https://vernonjames.ces.ncsu.edu/eleveth-annual-on-site/soil-based-wastewater-treatment/?356837>> [Consulta: 23 de abril de 2020].
24. LUANMANEE, Suphakarn; ATTANANDANA, Tasnee; MASUNAGA, Shizuto y WAKATSUKI, Takeshi. Treatment of domestic wastewater with a Multi-Soil-Layering System in a temperate and tropical climate. *Extension Bulletin, Food and Fertilizer Technology Center*. [en línea] <https://www.researchgate.net/publication/258239194_Treatment_of_Domestic_wastewater_with_a_Multi-Soil-Layering_MSL_System_in_a_Temperate_and_A_Tropical_Climate> [Consulta: 3 de junio de 2021].
25. MARRUGAT, Jaime. *Calculadora de Tamaño Muestral GRANMO del Instituto Municipal de Investigación Médica de Barcelona (Programa de cálculo online)*. [en línea] <<https://www.imim.cat/ofertadeserveis/software-public/granmo/>> [Consulta: 6 de abril de 2021.].
26. MASUNAGA, Tsugiyuki; SATO, Kuniaki; MORI, Junichi; SHIRAHAMA, Matsusige; KUDO, Hiromoto y WAKATSUKI, Toshiyuki.

Characteristics of wastewater treatment using a multi-soil-layering system in relation to wastewater contamination levels and hydraulic loading rates. *Soil Science and Plant Nutrition*. [en línea] <<https://doi.org/10.1111/j.1747-0765.2007.00128.x>> [Consulta 7 de mayo de 2021].

27. METCALF y EDDY. *Ingeniería de Aguas residuales: Tratamiento, vertido y reutilización*. 4a ed. Estados Unidos: McGraw-Hill Education, 2003. 218 pp.
28. MICROLAB INDUSTRIAL. *Las formas múltiples del Nitrógeno*. [en línea] 2017 <<https://www.aguasresiduales.info/revista/blog/las-formas-multiples-del-nitrogeno>> [Consulta: 7 de junio de 2021].
29. MINAE y MINSA. *DE-No 33601: Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales*. [en línea] <http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?nValor1=1&nValor2=59524> [Consulta: 25 de abril de 2020].
30. MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO. *Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS. TÍTULO J: Alternativas Tecnológicas en Agua y Saneamiento para el Sector Rural*. Colombia: Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados, 2012. 290 pp.
31. MONTENEGRO, Alejandra. *Reporte Analítico PTAR Urbanización Los Cenízaros*. Costa Rica: Agrotec Laboratorios Analíticos, 2020. 85 pp.

32. NACIONES UNIDAS. *Objetivo 6: Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos*. [En línea] 2015 [Consulta: 25 de abril de 2020.] <<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>>
33. PERALTA, Ivis. (2015). Composición típica de las aguas residuales domésticas crudas en Guatemala. *Agua, Saneamiento & Ambiente*. [En línea] 2015, 10(1), pp.50-59. <<http://www.revistasguatemala.usac.edu.gt/index.php/rcasa/article/view/1001/885>. />
34. PERALTA, Ivis y PÉREZ, Wilber. *Uso del suelo como tratamiento secundario de aguas residuales domésticas*. Trabajo de graduación de maestría. Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2016. 165 pp.
35. POCASANGRE, Adán. *Presentaciones del curso: Alcantarillado e Instalaciones Sanitarias en Edificios y Poblaciones*. Guatemala: Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria, USAC, 2020. 269 pp.
36. REED, Sherwood, MIDDLEBROOKS, Joe, y CRITES, Ronald. *Natural systems for waste management and treatment*. Estados Unidos: McGraw-Hill Education, 1988. 210 pp.
37. ROMERO, Jairo. *Tratamiento de aguas residuales: Teoría y principios de diseño*. Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2000. 780 pp.

38. RUIZ, Francisco. *Gestión de las Excretas y Aguas Residuales en Costa Rica*. Costa Rica: Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados, 2012. 165 pp.
39. SÁNCHEZ, Belén. *Procesos extensivos, depuración natural al alcance de todos: Tipos, ventajas e inconvenientes*. [en línea] 2015 <<https://www.iagua.es/blogs/belen-sanchez-baeza/procesos-extensivos-depuracion-natural-al-alcance-todos-tipos-ventajas-e>> [Consulta: 3 de mayo de 2021].
40. SATO, Kuniaki; IWASHIMA, Noriko; WAKATSUKI, Toshiyuki y MASUNAGA, Tsugiyuki. Quantitative evaluation of treatment processes and mechanisms of organic matter, phosphorus, and nitrogen removal in a multi-soil-layering system. *Soil Science and Plant Nutrition*. [en línea] <<https://doi.org/10.1080/00380768.2011.590944>> [Consulta: 6 de enero de 2021.]
41. SATO, Kuniaki; MASUNAGA, Tsugiyuki y WAKATSUKI, Toshiyuki. Characterization of Treatment Processes and Mechanisms of COD, Phosphorus and Nitrogen Removal in a Multi-Soil-Layering System. *Soil Science and Plant Nutrition*. [en línea] <<https://doi.org/10.1111/j.1747-0765.2005.tb00025.x>> [Consulta: 4 de marzo de 2021.]
42. SATO, Kuniaki; MASUNAGA, Tsugiyuki y WAKATSUKI, Toshiyuki. Water Movement Characteristics in a Multi-Soil-Layering System. *Soil Science and Plant Nutrition*. [en línea]

<<https://doi.org/10.1111/j.1747-0765.2005.tb00009.x>> [Consulta: 3 de mayo de 2021.]

43. SATO, Kuniaki; WAKATSUKI, Toshiyuki; IWASHIMA, Noriko y MASUNAGA Tsugiyuki. Evaluation of Long-Term Wastewater Treatment Performances in Multi-Soil-Layering Systems in Small Rural Communities. *Applied and Environmental Soil Science*. [en línea] <<https://doi.org/10.1155/2019/1214368>> [Consulta: 11 de abril de 2021].
44. SEGURA, Juan. Viabilidad económica, social y financiera de proyectos urbanos frente al desarrollo territorial. *Dimensión Empresarial*. [en línea] <<https://doi.org/10.15665/rde.v13i2.541>> [Consulta: 7 de mayo de 2021].
45. SONG, Pei; HUANG, Guohe; AN, Chunjiang; SHEN, Ju, ZHANG, Peng, CHEN, Xiujuan y SUN, Chaoxing. Treatment of rural domestic wastewater using multi-soil-layering systems: Performance evaluation, factorial analysis and numerical modeling. *Science of The Total Environment*. [en línea] <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.331>> [Consulta: 5 de marzo de 2021].
46. SUPRIYADI, Ir; WIDIJANTO, Hery; PRANOTO, Farida, y DEWI, Azri. Improving quality of textile wastewater with organic materials as multi soil layering. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. [en línea] <<https://doi.org/10.1088/1757-899x/107/1/012016>> [Consulta: 3 de mayo de 2021].

47. TENORIO, Rebeca. *Diseño preliminar del sistema de tratamiento de aguas residuales tipo especial de Finca 1 de la Universidad de Costa Rica, sede Rodrigo Facio*. Trabajo de graduación de Maestría. Universidad de Costa Rica, 2013. 192 pp.
48. VIDAL, Paola. *Presentaciones del curso: Sistemas de tratamiento de aguas*. Costa Rica: Universidad de Costa Rica, 2014. 200 p.
49. VON SPERLING, Marcos. *Wastewater characteristics, treatment and disposal*. Inglaterra: IWA Publishing, 2007. 360 pp.
50. ZHANG, Yi; CHENG, Yan; YANG, Chunping; LUO, Wei; ZENG, Guangming y LU, Li. Performance of system consisting of vertical flow trickling filter and horizontal flow multi-soil-layering reactor for treatment of rural wastewater. *Bioresource Technology*. [en línea] <<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.06.140>> [Consulta: 4 de abril de 2021].

APÉNDICES

Apéndice 1. Caracterización de materiales en laboratorio

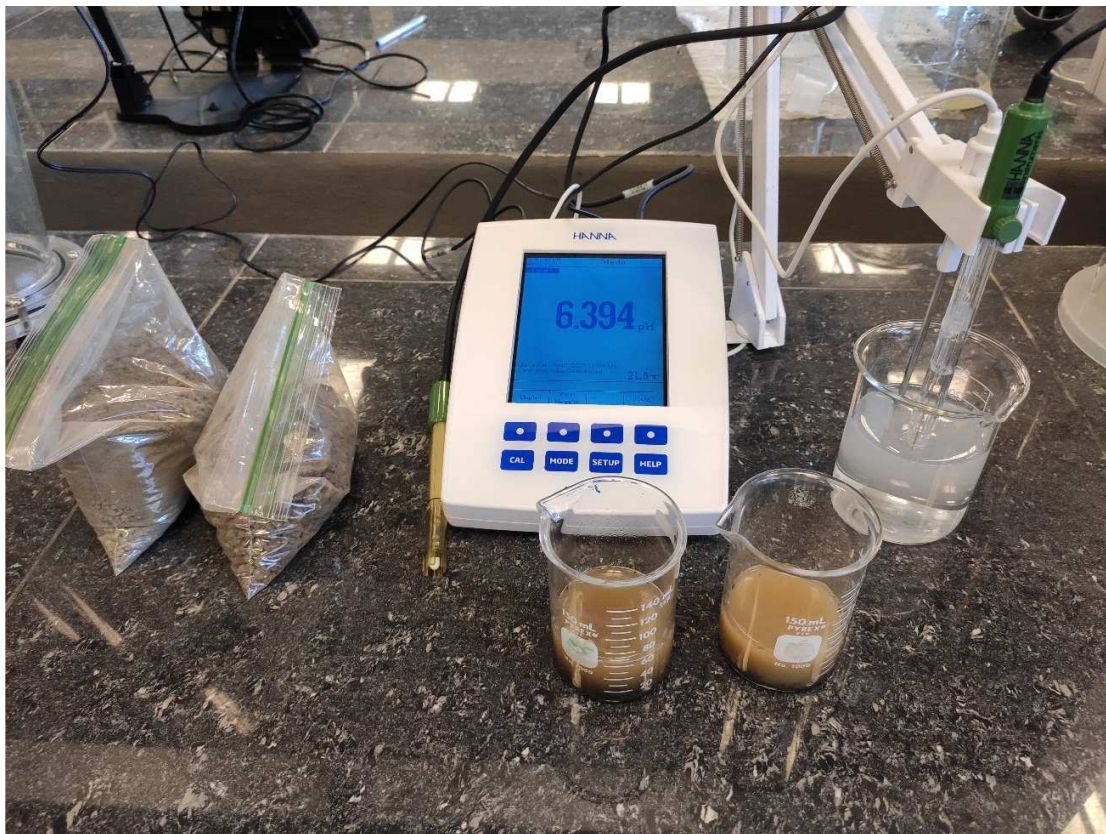


Ensayo		1		2		3		4		5		6	
Recipiente	38	51	3										
Número de golpes	28	23	18					44		15			
MW	22.27	25.07	25.07					18.19		16.53			
MS1	16.94	19.47	19.44					15.47		13.22			
MS2													
MC(g)	8.11	10.44	10.68					8.07		6.69			
MS-MW(g)													
%W	50.27	50.14	50.69										

MC = Masa Recipiente de Humedad
 MS = Masa del Recipiente más muestra seca
 MW = Masa del Recipiente más muestra húmeda
 %W = $\frac{MW - MS}{MS} \times 100$
 MS - MC

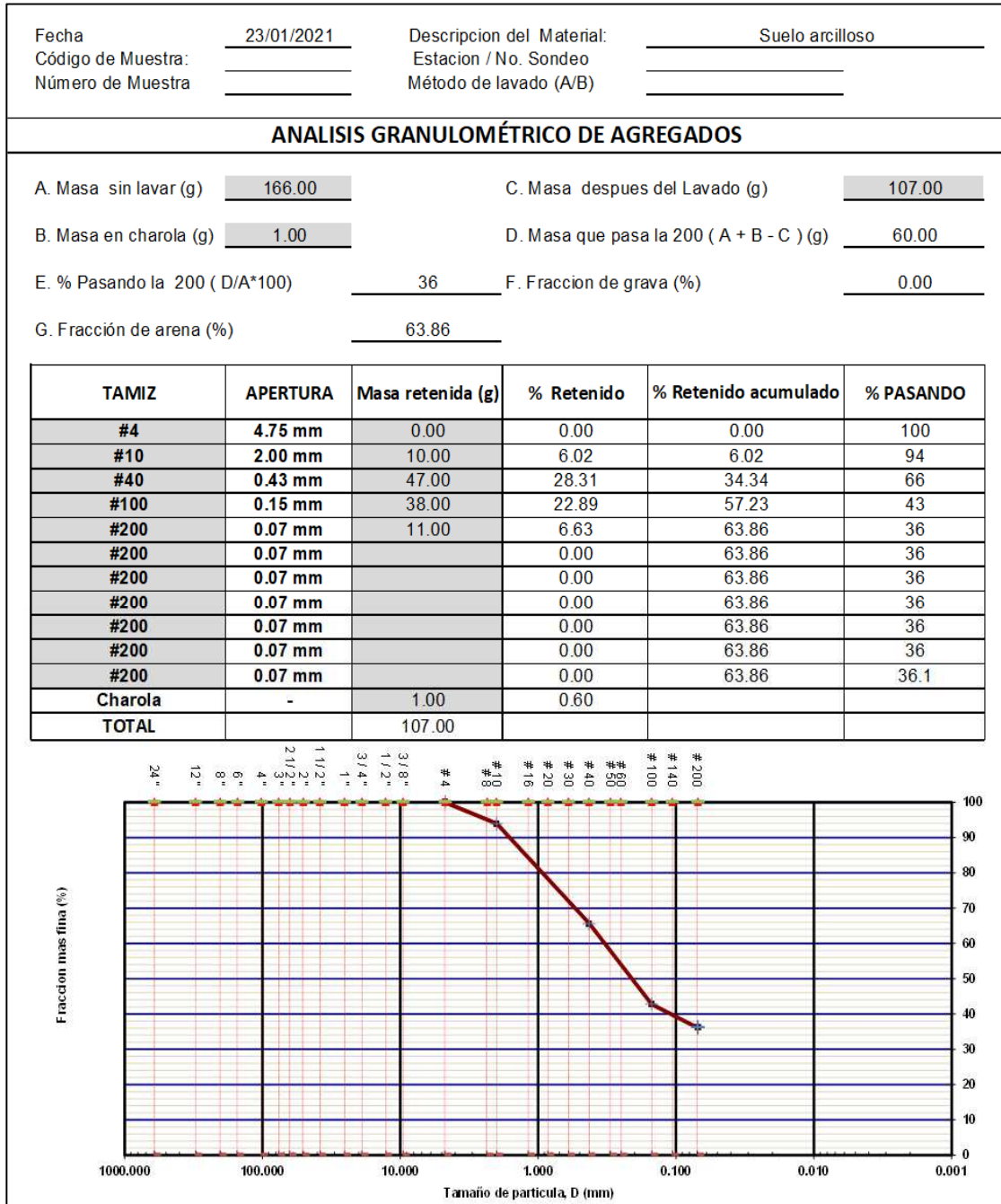


Continuación apéndice 1.

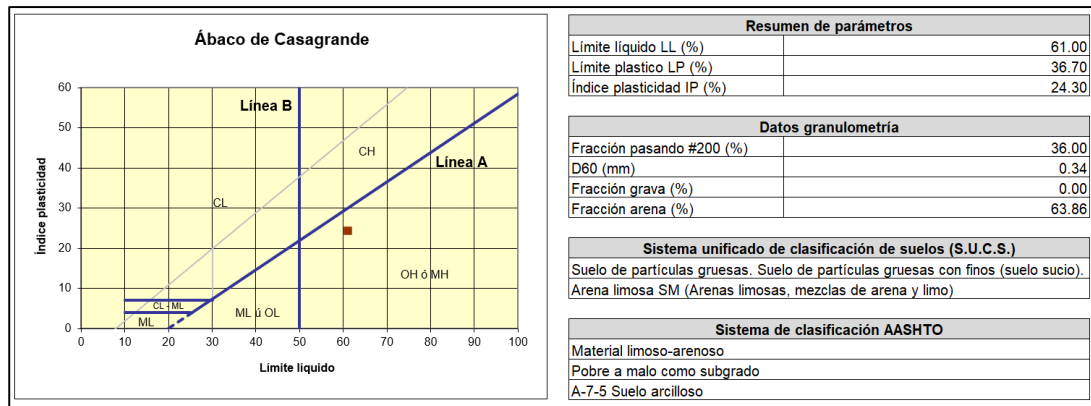
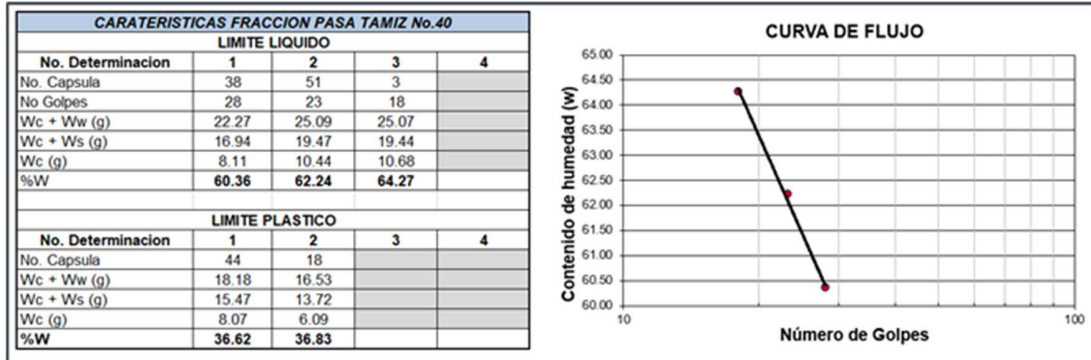


Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Resultados de caracterización del limo



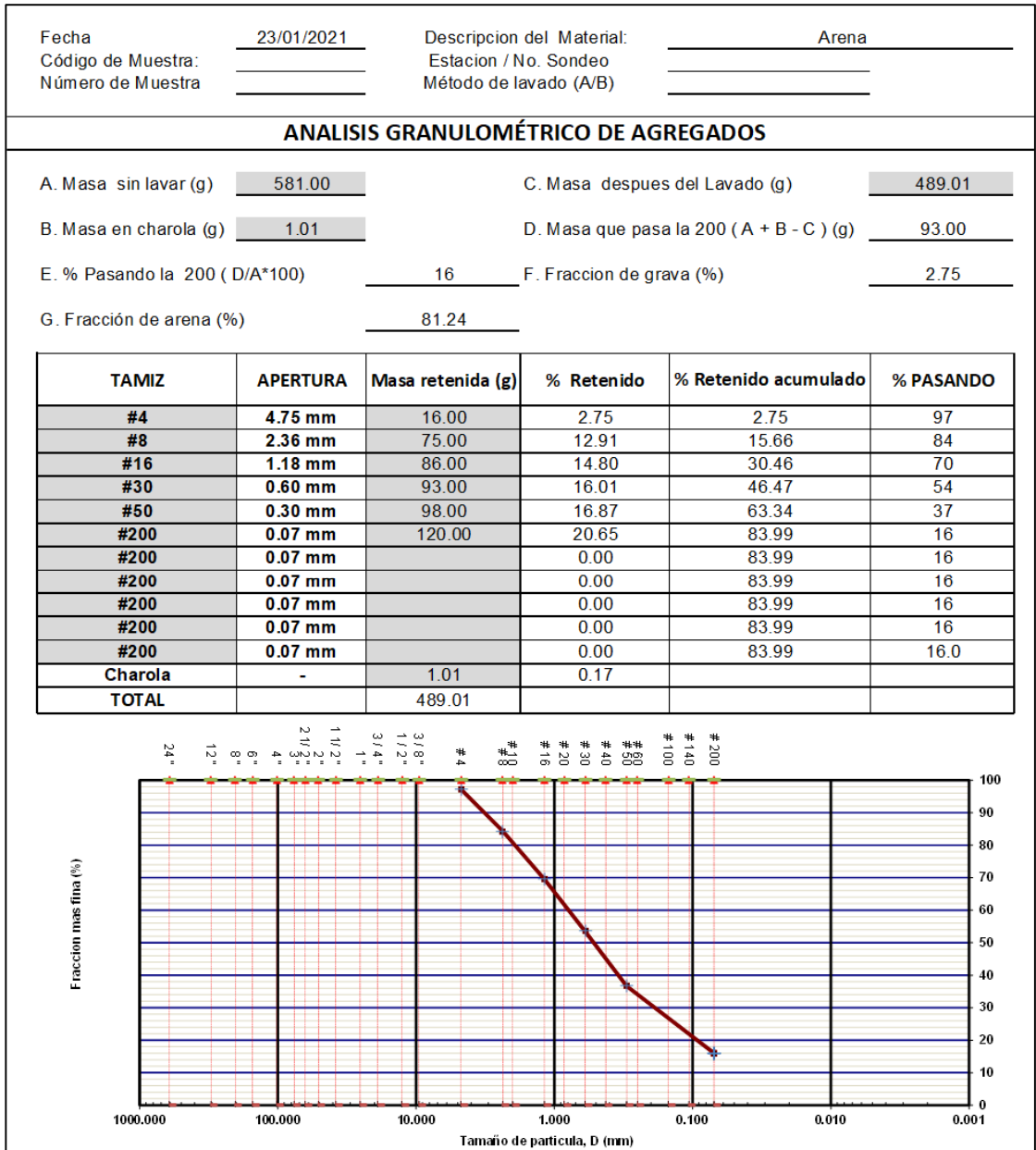
Continuación apéndice 2.



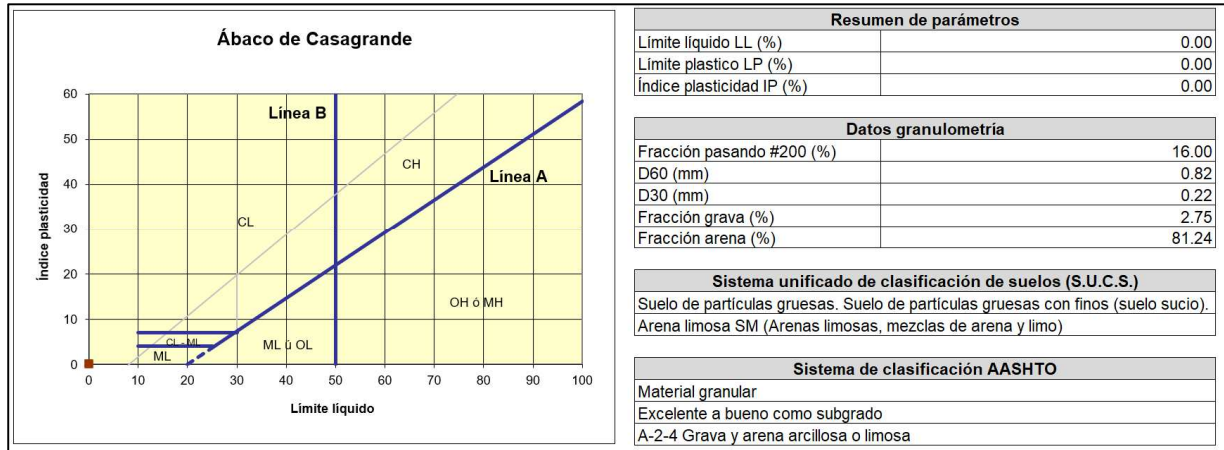
GRAVEDAD ESPECÍFICA DE SUELOS		
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	RESULTADOS
Temperatura de ensayo	°C	25
Identificación del picnómetro	-	-
Volumen calibrado del picnómetro, Vp	mL	500.00
Densidad del agua, pw,t	g / mL	0.99705
Masa calibrada picnómetro, Mp	g	161.50
Masa del picnómetro + Agua (Mpw,t)	g	660.03
Masa de picnómetro + muestra + agua (Mpws,t)	g	768.00
Masa muestra seca al horno (Ms)	g	174.00
Coefficiente K	-	0.99884
Gravedad específica, Gt	-	2.635
Gravedad específica 20°C, G20°C	-	2.632
Mpws,t = Mp + Vp * pw,t Gt = Ms / (Mpw,t - (Mpws,t - Ms))		G20°C = K * Gt

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. Resultados de caracterización de la arena



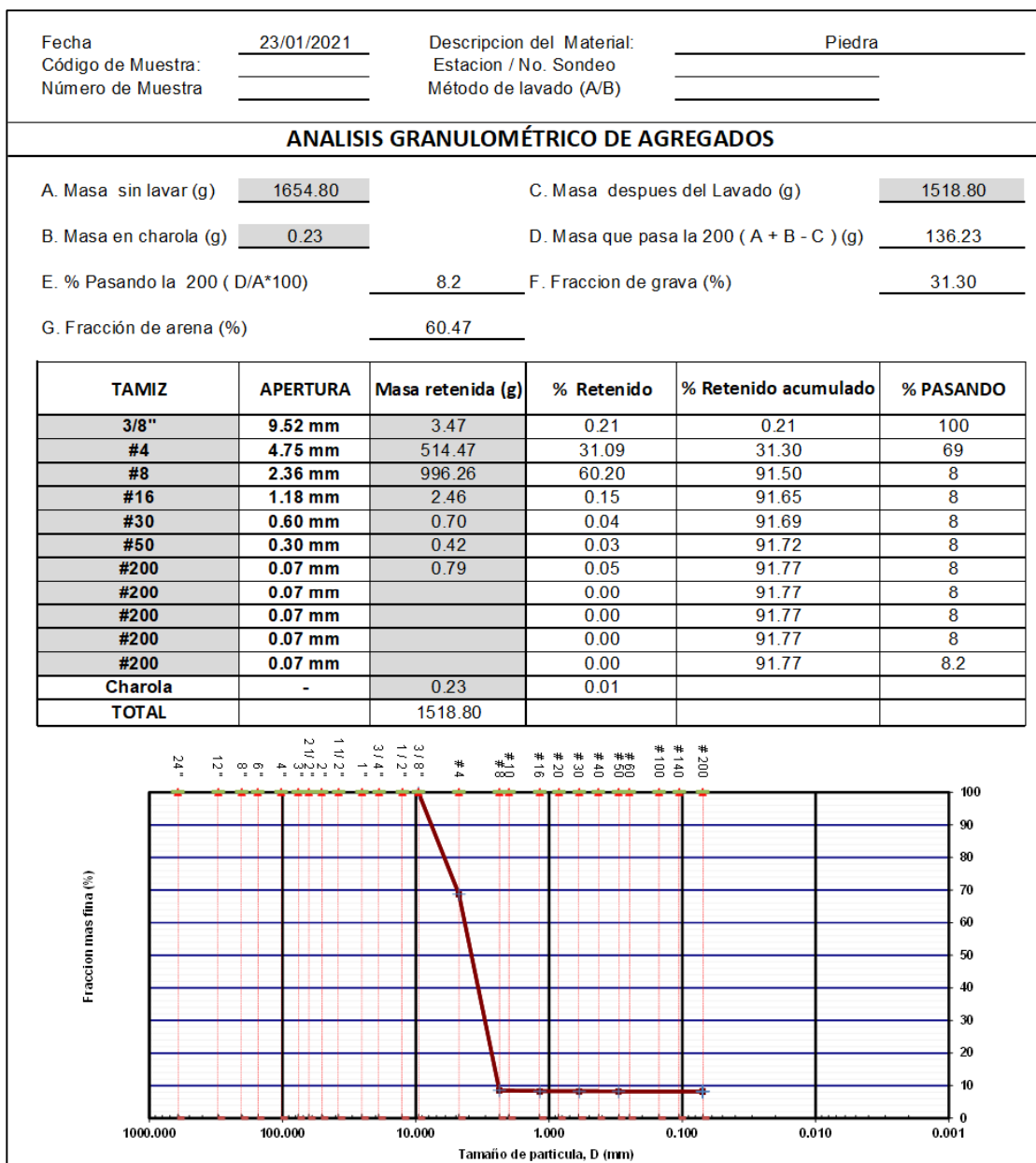
Continuación apéndice 3.



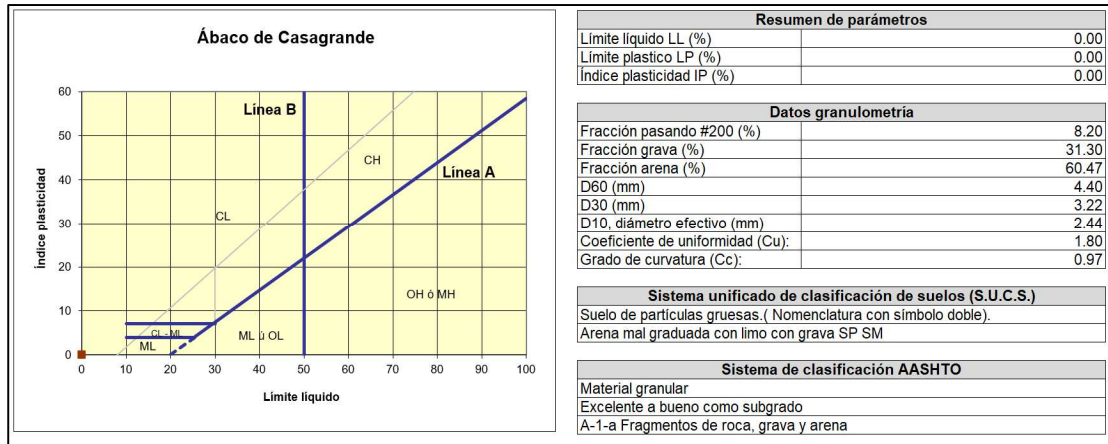
GRAVEDAD ESPECÍFICA DE SUELOS		
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	RESULTADOS
Temperatura de ensayo	°C	25
Identificación del picnometro	-	-
Volumen calibrado del picnometro, Vp	mL	500.00
Densidad del agua, pw,t	g / mL	0.99705
Masa calibrada picnometro, Mp	g	176.20
Masa del picnometro + Agua (Mpw,t)	g	674.73
Masa de picnometro + muestra + agua (Mpws,t)	g	769.00
Masa muestra seca al horno (Ms)	g	152.00
Coefficiente K	-	0.99884
Gravedad específica, Gt	-	2.633
Gravedad específica 20°C, G _{20°C}	-	2.630
$Mpw,t = Mp + Vp \cdot pw,t \quad Gt = Ms / (Mpw,t - (Mpws,t - Ms)) \quad G_{20^\circ C} = K \cdot Gt$		

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. Resultados de caracterización de la piedra



Continuación apéndice 4.



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. **Proceso de construcción de los pilotos**



Continuación apéndice 5.



Continuación apéndice 5.



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. Fotografías de ensayos en laboratorio



Continuación apéndice 6.



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 7. Presupuesto detallado PTAR propuesta

ITEM	DESCRIPCION	UNID	CANTID	PRECIO UNIT MATERIALES	TOT MATERIAL	PREC UNIT SUB- CONTRATO	TOTAL SUB- CONTRATO	PREC/UNI MANO DE OBRA	TOTAL MANO DE OBRA	COSTO TOTAL POR ITEM
1	Cerramiento provisionales y obras de protección	ml	115.00							
	Piezas de 2"*4"*4 varas	unidad	76.67	480.00	36,800.00					
	Regla de 1"*3"*4 varas	unidad	68.45	1,850.00	126,636.90					
	Clavos de 2,1/2"	kilo	5.00	823.08	4,115.41					
	Lamina hg No 32 en 10 pies	unidad	188.52	5,405.00	1,018,975.41					
	Clavos para techo de 2,1/2"	kilo	3.00	1,927.78	5,783.34					
	Candados	unidad	1.00	11,639.00	11,639.00					
	Mano obra	global	1.00					722,370.04	722,370.04	
	Subtotal este Item					1,203,950.07		0.00	722,370.04	1,926,320.10
2	Redes provisionales y pago servicios	global	1.00							
	Cable No 12	ml	30.00	360.00	10,800.00					
	Tubo conduit pvc 12 mm	unidad	0.00	535.40	0.00					
	Curva conduit pvc 12 mm	unidad	0.00	61.95	0.00					
	Conector conduit emt 12 mm	unidad	0.00	80.00	0.00					
	Interruptor de cuchilla	unidad	1.00	10,320.00	10,320.00					
	Base para medidor clase 100	unidad	1.00	3,620.00	3,620.00					
	Conduleta botagua 50 mm	unidad	1.00	3,890.00	3,890.00					
	Tubo emt 38 mm	unidad	1.00	6,520.00	6,520.00					
	Conector emt 38 mm	unidad	2.00	1,630.00	3,260.00					
	Cable No 4	ml	8.00	690.00	5,520.00					
	Valvula paso 13 mm	unidad	1.00	1,650.00	1,650.00					
	Tubo pvc 13 mm	unidad	5.00	1,619.00	8,095.00					
	Codo 90 pvc 13 mm	unidad	5.00	97.00	485.00					
	Tee pvc 13 mm	unidad	3.00	100.00	300.00					
	Llave de riego 13 mm	unidad	1.00	1,269.00	1,269.00					
	Pegamento pvc	cuarto	1.00	5,814.00	5,814.00					
	Mano de obra red electromecanica	global	1.00					27,078.92	27,078.92	
	Pago servicios electricos	mes	1.00	85,000.00	85,000.00					
	Pago servicios telefonicos	mes	1.00	12,500.00	12,500.00					
	Pago servicios agua potable	mes	0.00	20,000.00	0.00					
Subtotal este Item					159,043.00		0.00	27,078.92	186,121.92	
3	Seguridad ocupacional en general	global	1.00							
	Chalecos	Unidad	6.00	2,315.25	13,891.50					
	Cascos de seguridad	Unidad	6.00	2,945.25	17,671.50					
	Anteojos de seguridad	Unidad	6.00	708.75	4,252.50					
	Guantes de cuero	Par	6.00	661.50	3,969.00					
	Capas de construccion	Unidad	6.00	5,230.00	31,380.00					
	Cinturones de seguridad	Unidad	1.00	25,000.00	25,000.00					
	Botiquin primeros auxilios	mes	1.00	6,800.00	6,800.00					
	Malla precaucion 930 mts)	rollo	0.00	20,000.00	0.00					
	Subtotal este Item					102,964.50		0.00	0.00	102,964.50

Continuación apéndice 7.

ITEM	DESCRIPCION	UNID	CANTID	PRECIO UNIT MATERIALES	TOT MATERIAL	PREC UNIT SUB-	TOTAL SUB- CONTRATO	PREC/UNI MANO DE	TOTAL MANO DE OBRA	COSTO TOTAL POR ITEM
4	Alquileres y compra de equipos de construccion	global	1.00							
	Planchas vibratorias (1 unidad)	mes	1.00	103,920.00	103,920.00					
	Alquiler back hoe	hr	20.00	12,200.00	244,000.00					
	Puntales (10 unidad)	mes	2.00	22,000.00	44,000.00					
	Andamios (5)	mes	2.00	55,000.00	110,000.00					
	Vigas de aluminio (0)	mes	0.00	76,800.00	0.00					
	Batidora (1)	mes	4.00	90,000.00	360,000.00					
	Carretillos	unidad	5.00	8,600.00	43,000.00					
	Palas carrileras	unidad	4.00	3,600.00	14,400.00					
	Picos	unidad	2.00	6,100.00	12,200.00					
	Taladros, patines, sierras, sisalla	mes	1.00	33,200.00	33,200.00					
	Cabañas sanitarias (1)	mes	1.00	40,000.00	40,000.00					
	Subtotal este Item					1,004,720.00		0.00	0.00	1,004,720.00
	5	Transportes de materiales	global	1.00						
Transportes generales		global	1.00	400,000.00	400,000.00	0.00	0.00			
Subtotal este Item					400,000.00		0.00	0.00	400,000.00	
6	Topografía general	visitas	1.00							
	Visitas topografía	visitas	1.00	150,000.00	150,000.00					
	Subtotal este Item				150,000.00		0.00	0.00	150,000.00	
7	Dirección y supervisión	mes	4.00							
	Maestro de obras (1)	mes	4.00				1,004,560.00	4,018,240.00		
	Ingeniero (25%)	mes					375,000.00	0.00		
	Subtotal este Item				0.00		0.00	4,018,240.00	4,018,240.00	
8	Poliza de riesgos del trabajo	global	1.00							
	Pago poliza riesgos del trabajo	global	1.00				668,250.00	668,250.00		
	Subtotal este Item				0.00		0.00	668,250.00	668,250.00	
9	Estadia personal en la zona	global	4.00							
	Alimentacion (8 personas)	mes	4.00	623,520.00	2,494,080.00					
	Alquiler residencias	mes	4.00	150,000.00	600,000.00					
	Pasajes	mes	0.00	150,000.00	0.00					
	Subtotal este Item				3,094,080.00		0.00	0.00	3,094,080.00	

Continuación apéndice 7.

ITEM	DESCRIPCION	UNID	CANTID	PRECIO UNIT MATERIALES	TOT MATERIAL	PREC UNIT SUB-	TOTAL SUB- CONTRATO	PREC/UNI MANO DE	TOTAL MANO DE OBRA	COSTO TOTAL POR ITEM
10	Movimiento de tierra	m3	512.00							
	Back hoe	hr	102.40	12,000.00	1,228,800.00					
	Botada tierra	viaje	21.33	35,000.00	746,666.67					
	Subtotal este Item				1,975,466.67		0.00		0.00	1,975,466.67
11	Trazado general	m2	528.00							
	Piezas de 2"*4"*4 varas	unidad	26.40	480.00	12,672.00					
	Regla de 1"*3"*4 varas	unidad	39.60	1,850.00	73,260.00					
	Clavos de 2,1/2"	kilo	7.92	823.08	6,518.81					
	Consumibles	global	1.00	4,622.54	4,622.54					
	Mano de obra trazado	m2	528.00					400.00	211,200.00	
	Subtotal este Item				97,073.35		0.00		211,200.00	308,273.35
12	Sellos de concreto pobre	m3	7.05							
	Cemento	saco	31.72	6,500.00	206,153.69					
	Arena	m3	5.64	11,300.00	63,713.82					
	Piedra quebrada	m3	7.05	12,430.00	87,606.51					
	Mano de obra de sellos	m3	7.05					20,000.00	140,959.79	
	Subtotal este Item				357,474.02		0.00		140,959.79	498,433.81
13	Losa de fundación F-1	m3	74.99					40,000.00	2,999,700.00	
	Cemento	saco	622.44	6,500.00	4,045,845.38					
	Arena	m3	37.50	11,300.00	423,707.63					
	Piedra quebrada	m3	59.09	12,430.00	734,539.54					
	Acero de refuerzo	kilo	3,943.30	52.58				200.00	788,659.20	
	Varilla No 3 grado 60 en 6 mts	unidad	66.00	1,755.00	115,830.00					
	Varilla No 4 grado 60 en 6 mts	unidad	624.00	3,414.00	2,130,336.00					
	Varilla No 8 grado 60 en 6 mts	unidad	0.00	13,394.16	0.00					
	Varilla lisa No 2	unidad	0.00	847.35	0.00					
	Alambre negro No 16	kilo	118.30	780.00	92,273.13					
Subtotal este Item				7,542,531.67		0.00		3,788,359.20	11,330,890.87	

Continuación apéndice 7.

ITEM	DESCRIPCION	UNID	CANTID	PRECIO UNIT MATERIALES	TOT MATERIAL	PREC UNIT SUB-	TOTAL SUB- CONTRATO	PRECUNI MANO DE	TOTAL MANO DE OBRA	COSTO TOTAL POR ITEM
	Losa sobre unidades LC-1	m3	3.57					35,000.00	124,950.00	
	Cemento	saco	29.63	6,500.00	192,601.50					
	Arena	m3	1.79	11,300.00	20,170.50					
	Piedra quebrada	m3	2.81	12,430.00	34,967.58					
	Acero de refuerzo	kilo	289.16	81.00				200.00	57,831.65	
	Varilla No 3 grado 60 en 6 mts	unidad	26.77	1,755.00	46,988.37					
	Varilla No 4 grado 60 en 6 mts	unidad	33.40	3,414.00	114,027.60					
	Varilla No 8 grado 60 en 6 mts	unidad	0.00	13,394.16	0.00					
14	Varilla lisa No 2	unidad	0.00	847.35	0.00					
	Alambre negro No 16	kilo	8.67	780.00	6,766.30					
	Formaleta	m2	18.40					4,200.00	77,280.00	
	Tabla de 1" x 12" x 4 varas (2 usos)	unidad	9.20	6,400.00	58,880.00					
	Piezas de 2" x 4" x 4 varas	unidad	2.76	480.00	1,324.80					
	Regla de 1" x 3" x 4 varas	unidad	5.75	1,850.00	10,637.50					
	Clavos de 2,1/2" corriente	kilo	0.92	823.08	757.24					
	Desmoldante	galon	0.46	3,616.00	1,663.36					
	Subtotal este Item				488,784.75		0.00		260,061.65	748,846.40
	Losa sobre RAFAs LC-2	m3	1.66					35,000.00	58,191.00	
	Cemento	saco	13.80	6,500.00	89,697.27					
	Arena	m3	0.83	11,300.00	9,393.69					
	Piedra quebrada	m3	1.31	12,430.00	16,284.90					
	Acero de refuerzo	kilo	1,447.78	870.79				200.00	289,556.48	
	Varilla No 3 grado 60 en 6 mts	unidad	133.87	1,755.00	234,938.34					
	Varilla No 4 grado 60 en 6 mts	unidad	167.34	3,414.00	571,281.69					
	Varilla No 8 grado 60 en 6 mts	unidad	0.00	13,394.16	0.00					
15	Varilla lisa No 2	unidad	0.00	847.35	0.00					
	Alambre negro No 16	kilo	43.43	780.00	33,878.11					
	Formaleta	m2	11.08					4,200.00	46,552.80	
	Tabla de 1" x 12" x 4 varas (2 usos)	unidad	5.54	6,400.00	35,468.80					
	Piezas de 2" x 4" x 4 varas	unidad	1.66	480.00	798.05					
	Regla de 1" x 3" x 4 varas	unidad	3.46	1,850.00	6,407.94					
	Clavos de 2,1/2" corriente	kilo	0.55	823.08	456.15					
	Desmoldante	galon	0.28	3,616.00	1,001.99					
	Subtotal este Item				999,606.93		0.00		394,300.28	1,393,907.21
	Muros	m3	56.75					35,000.00	1,986,407.50	
	Cemento	saco	471.06	6,500.00	3,061,905.28					
	Arena	m3	28.38	11,300.00	320,662.93					
	Piedra quebrada	m3	44.72	12,430.00	555,901.25					
	Acero de refuerzo	kilo	4,760.21	83.87				200.00	952,042.80	
	Varilla No 3 grado 60 en 6 mts	unidad	167.50	1,755.00	293,962.50					
	Varilla No 4 grado 60 en 6 mts	unidad	416.50	3,414.00	1,421,931.00					
	Varilla No 5 grado 60 en 6 mts	unidad	184.00	5,331.67	981,027.28					
16	Varilla lisa No 2	unidad	0.00	847.35	0.00					
	Alambre negro No 16	kilo	142.81	780.00	111,389.01					
	Formaleta	m2	13.80					4,200.00	57,960.00	
	Tabla de 1" x 12" x 4 varas (2 usos)	unidad	6.90	6,400.00	44,160.00					
	Piezas de 2" x 4" x 4 varas	unidad	2.07	480.00	993.60					
	Regla de 1" x 3" x 4 varas	unidad	4.31	1,850.00	7,978.13					
	Clavos de 2,1/2" corriente	kilo	0.69	823.08	567.93					
	Desmoldante	galon	0.35	3,616.00	1,247.52					
	Subtotal este Item				6,801,726.41		0.00		2,996,410.30	9,798,136.71

Continuación apéndice 7.

ITEM	DESCRIPCION	UNID	CANTID	PRECIO UNIT MATERIALES	TOT MATERIAL	PREC UNIT SUB-	TOTAL SUB- CONTRATO	PREC/UNI MANO DE	TOTAL MANO DE OBRA	COSTO TOTAL POR ITEM	
17	Viguetas pretensadas	ml	0.00	750.00	0.00			262.50	0.00		
	Subtotal este Item				0.00				0.00	0.00	
18	Filtros MSL										
	Grava como material permeable	m3	72.00	13,600.00	979,200.00			4,080.00	293,760.00		
	Piedra cuarta como fondo falso	m3	6.00	15,000.00	90,000.00			4,500.00	27,000.00		
	Carbón activado	m3	27.00	600,000.00	16,200,000.00			500.00	13,500.00		
	Bolsas de yute	unidad	24,000.00	300.00	7,200,000.00			100.00	2,400,000.00		
	Subtotal este Item					24,469,200.00			2,734,260.00	27,203,460.00	
19	Muretes Lechos secado VE-1	m3	6.55					35,000.00	229,390.00		
	Cemento	saco	54.40	6,500.00	353,588.30						
	Arena	m3	3.28	11,300.00	37,030.10						
	Piedra quebrada	m3	5.16	12,430.00	64,195.38						
	Acero de refuerzo	kilo	531.56	81.10				200.00	106,311.52		
	Varilla No 3 grado 60 en 6 mts	unidad	65.19	1,755.00	114,411.38						
	Varilla No 4 grado 60 en 6 mts	unidad	52.40	3,414.00	178,893.60						
	Varilla No 5 grado 60 en 6 mts	unidad	0.00	8,023.00	0.00						
	Varilla lisa No 2	unidad	0.00	847.35	0.00						
	Alambre negro No 16	kilo	15.95	780.00	12,438.45						
	Formaleta	m2	13.11					4,200.00	55,053.60		
	Tabla de 1"*12"*4 varas (2 usos)	unidad	6.55	6,400.00	41,945.60						
	Piezas de 2"*4"*4 varas	unidad	1.97	480.00	943.78						
	Regla de 1"*3"*4 varas	unidad	4.10	1,850.00	7,578.06						
	Clavos de 2,1/2" corriente	kilo	0.66	823.08	539.45						
	Desmoldante	galon	0.33	3,616.00	1,184.96						
	Subtotal este Item					812,749.05		0.00	390,755.12	1,203,504.17	
	20	Cubierta de la PTAR	m2	55.58	8,000.00	444,640.00			4,000.00	222,320.00	
		Subtotal este Item				444,640.00				222,320.00	666,960.00
21	Instalación Mecánica de la PTAR	global	1.00	1,500,000.00	1,500,000.00			600,000.00	600,000.00		
	Subtotal este Item				1,500,000.00				600,000.00	2,100,000.00	
22	Equipos Mecánicos										
	Bombas de agua cruda	unidad	3.00	915,000.00	2,745,000.00			274,500.00	823,500.00		
	Equipo de desinfección	unidad	1.00	915,000.00	915,000.00			274,500.00	274,500.00		
	Quemador de gases	unidad	2.00	1,830,000.00	3,660,000.00			549,000.00	1,098,000.00		
	Subtotal del Item				7,320,000.00				2,196,000.00	9,516,000.00	

Continuación apéndice 7.

ITEM	DESCRIPCION	UNID	CANTID	PRECIO UNIT MATERIALES	TOT MATERIAL	PREC UNIT SUB-	TOTAL SUB- CONTRATO	PREC/UNI MANO DE	TOTAL MANO DE OBRA	COSTO TOTAL POR ITEM
23	Instalación Eléctrica									
	Acometidas eléctricas y de telecomunicaciones	global	1.00	1,976,400.00	1,976,400.00			395,280.00	395,280.00	
	Sálidas eléctricas	global	1.00	5,093,500.00	5,093,500.00			1,018,700.00	1,018,700.00	
	Salidas de control	global	1.00	2,196,000.00	2,196,000.00			439,200.00	439,200.00	
	Malla de puesta a tierra y pararrayos	unidad	1.00	768,600.00	768,600.00			153,720.00	153,720.00	
	Canasta	global	1.00	107,970.00	107,970.00			21,594.00	21,594.00	
	Iluminación exterior	global	1.00	845,460.00	845,460.00			169,092.00	169,092.00	
	Tablero Eléctrico	unidad	1.00	1,931,016.00	1,931,016.00			386,203.20	386,203.20	
	Switch de Transferencia ASCO 200A MONOFÁSICO	unidad	1.00	2,034,228.00	2,034,228.00			406,845.60	406,845.60	
	Tablero de control y equipos de comunicación	unidad	1.00	1,641,363.60	1,641,363.60			328,272.72	328,272.72	
	Subtotal del Item				16,594,537.60				3,318,907.52	19,913,445.12
24	Malla perimetral y portón	ml	115.00			14,000.00	1,610,000.00			
	Subtotal del Item						1,610,000.00			1,610,000.00
25	Caseta de operaciones									
	Construcción de la caseta	m2	15.00			500,000.00	7,500,000.00			
	Aceras	m2	80.02			20,130.00	1,610,802.60			
	Pluvial	global	1.00			3,500,000.00	3,500,000.00			
	Parqueo	m2	81.00			60,000.00	4,860,000.00			
	Subtotal de este item						17,470,802.60			17,470,802.60

Fuente: elaboración propia.

ANEXOS

Anexo 1. Recopilación de estructuras y materiales utilizados en experimentos acerca de sistemas MSL

System dimension (L × W × H cm)	Soil block dimension (L × W × H cm)	Horizontal intervals between soil blocks (cm)	Height of PL layer (cm)	Material of PL	Material of SMB	References
50 × 10 × 70	10 × 10 × 4	2.5	4	Zeolite, expanded clay aggregates, oyster shells used granular activated carbon	Sandy clay, powdered activated carbon, rice straws and iron scraps (75, 10, 5 and 10%)	(Ho and Wang, 2015)
30 × 36 × 65	10 × 5 × 30	5	5	Gravel	Sandy soil, charcoal, sawdust and metal iron (70, 10, 10, and 10%)	(Latrach et al., 2015)
32 × 16 × 60	16 × 8 × 16	5	5	Zeolite to iron scraps (5 - 95%)	Clayey soil, sawdust and iron scraps (75, 10 and 15%)	(Luo et al., 2014)
50 × 10 × 75	9 × 10 × 3.6	2.8	4.7	Zeolite	Soil, sawdust, iron, and charcoal (50, 30, 10 and 10%)	(Guan et al., 2012)
50 × 10 × 73	12 × 10 × 5	3.5	5	Zeolite layers (3 - 5 mm)	Andisol, sawdust, granular iron, and charcoal (70, 10, 10 and 10%)	(Sato et al., 2011a)
50 × 10 × 73	12 × 10 × 5	3.5	5	Zeolite	Andisol, sawdust, granular iron, and charcoal in ratios of 70, 10, 10 and 10%	(Sato et al., 2011b)c
45.7 (diameter) × 100	5 × 10 × 22, 5 × 10 × 38	0	5	Leilehua soil and perlite	Honouliuli soil, ground charcoal, fine sawdust, and 1mm diameter iron filings (70, 10, 10 and 10%)	(Patmaik et al., 2008)
50 × 10 × 120	20 × 10 × 10	5	7	Zeolite (1-3 mm)	Andisol, sawdust and granular metal iron (75, 12.5 and 12.5%)	(Masunaga et al., 2007b)
50 × 10 × 120	20 × 10 × 10	5	7	Zeolite (1-3 mm)	Andisol, sawdust and granular metal iron (75%, 12.5% and 12.5%)	(Masunaga et al., 2007a)
50 × 10 × 73	12 × 10 × 5	5	5	Zeolite (3-5 mm)	Soil (Andisol), saw dust, granular iron and charcoal (71.6, 10.5, 11.9 and 6.0%)	(Sato et al., 2005a)
50 × 10 × 73	12 × 10 × 5	5	5	Zeolite (3-5 mm)	Soil (Andisol), saw dust, granular iron and charcoal (71.6, 10.5, 11.9 and 6.0%)	(Sato et al., 2005b)
50 × 15 × 100	14.5 × 15 × 4.6	3.5	2	Zeolite	Sandy clay soil, kenaf plus corn-cob and iron scraps (75, 12.5, 12.5%), charcoal cover	(Boonsook et al., 2003)
180 × 80 × 105	70 × 85 × 10	20	10	Zeolite (1 - 3 and 3 - 5 mm)	Soil (Andisol or Entisol), saw dust, granular iron and charcoal (67.5, 11.25, 11.25 and 10%, 78.3, 7.5, 7.5 and 6.7%)	(Masunaga et al., 2003b)
100 × 200 × 150	100 × 60 × 8	5	5	Zeolite	Clayey soil, sawdust and iron scraps (75, 10 and 15%), 2 cm charcoal cover	(Luanmanee et al., 2002b)
15 × 50 × 100	14.5 × 15 × 4.6		2	Zeolite	Sawdust, sandy clay soil and iron scraps (12.5, 75 and 12.5%), 1.6 cm charcoal cover	(Luanmanee et al., 2002c)
350 × 250 × 120	60 × 10 × 175	10	5	Zeolite	Sandy clay soil, iron, pelletized jute, forest floor litter (60, 15, 10, and 15)	(Sato et al., 2002)
100 × 200 × 150	100 × 60 × 8	5	5	Zeolite	Soil mixed, sawdust, iron scraps (75, 10 and 15%), 2-3 cm charcoal cover	(Attanandana et al., 2000)

Fuente: AN *et al.* *Multi-Soil-Layering Systems for Wastewater Treatment in Small and Remote Communities*. p.136.

Anexo 2. Recopilación de cargas hidráulicas utilizadas en experimentos acerca de sistemas MSL y eficiencias de remoción alcanzadas

HLR (L/m ² d)	Aeration	COD (mg/L) (Removal %)	BOD (mg/L) (Removal %)	TN (mg/L) (Removal %)	TP (mg/L) (Removal %)	SS (mg/L) (Removal %)	Clogging	Reference
660	No	417.47 ± 89.01 (92.5)	-	49.02 ± 7.74 (89.5)	4.22 ± 0.82 (91.0)	-	No	(Zhang et al., 2015b)
660	No	255.20 ± 65.12 (92.3)	-	49.31 ± 9.91 (89.4)	3.91 ± 0.41 (92.1)	-	No	
660	No	98.68 ± 35.22 (81.8)	-	49.58 ± 7.23 (73.6)	3.93 ± 0.31 (91.9)	-	No	
200	No	641 ± 12 (81)	201 ± 3 (86)	100.5 ± 1.5 (78)	3.6 ± 0.07 (80)	164 ± 3 (93)	No	(Latrach et al., 2015)
500	No	170.7 - 203.2 (54.6 - 76.9)	-	NH ₃ -N: 24.6 - 27.5 (77.9 - 99.7)	7.9 - 10.7 (97.8 - 99.1)	11.28 - 16.77 (63.2 - 94.5)	-	(Ho and Wang, 2015)
1000	No	(33.9 - 65.2)	-	(53.8 - 99.7)	(94.4 - 98.3)	(54.9 - 90.3)	-	
2000	No	(22.9 - 49.4)	-	(41.3 - 98.6)	(90.5 - 96.3)	(33.5 - 88.9)	-	
3000	No	(26.8 - 42.7)	-	(24.8 - 93.4)	(91.4 - 93.3)	(32.4 - 74.2)	-	
240	No	265 ± 17 (92.8)	-	60.0 ± 3.59 (63.5)	5.32 ± 0.46 (58.6)	-	No	(Luo et al., 2014)
440	No	210 ± 15 (79.0)	-	57.7 ± 3.69 (52.3)	4.61 ± 0.66 (47.3)	-	No	
200	No	218.4 ± 133.8 (72.0 ± 20.3)	-	73.7 ± 14.3 (66.5 ± 33.1)	1.1 ± 1.3 (84.1 ± 17.6)	-	No	(Guan et al., 2012)
400	No	(62.0 ± 18.4)	-	(44.0 ± 34.2)	(54.9 ± 40.8)	-	No	
800	Occasional	(45.3 ± 15.7)	-	(29.0 ± 39.5)	(33.9 ± 39.6)	-	Yes	
1600	Occasional	(35.3 ± 17.9)	-	(25.5 ± 29.8)	(26.1 ± 37.5)	-	Yes	
1000	No	65.7 (87.7)	28.1 (98.0)	9.8 (73.5)	1 (94.1)	14.9	Yes	(Sato et al., 2011b)
500	No	43.9 ± 21.5 (89)	32.1 ± 20.9 (94)	6.3 ± 1.7 (44)	0.76 ± 0.30 (73)	27.8 ± 21.9 (93)	No	(Masunaga et al., 2007a)
1000	No	(84)	(94)	(48)	(69)	(90)	No	
1250	No	(83)	(94)	(51)	(69)	(91)	No	
1500	No	(86)	(95)	(47)	(66)	(92)	No	
2000	No	(85)	(91)	(56)	(63)	(94)	Yes	
500	No	121.6 ± 96.7 (94)	69.5 ± 52.7 (98)	9.6 ± 2.7 (45)	1.47 ± 1.16 (89)	78.3 ± 75.3 (95)	No	
1000	No	(92)	(94)	(54)	(85)	(96)	No	
1250	No	(91)	(95)	(56)	(74)	(93)	Yes	
1500	No	(90)	(94)	(48)	(71)	(92)	Yes	
2000	No	(87)	(88)	(57)	(65)	(91)	Yes	
1000 - 3000	-	51.3 - 65 (60.2 - 87.0)	29.1 - 38.5 (75.7 - 92.6)	8.7 - 11.4 (34.0 - 62.7)	0.99 - 1.44 (50.6 - 61.7)	70.7 - 73.3 (81.7 - 97.2)	-	(Chen et al., 2007)
1000 - 4000	No	26 (63 - 85)	11 (72 - 84)	5.4 (22 - 39)	0.22 (52 - 67)	29 (72 - 84)	At 4000 HLR	(Masunaga et al., 2003b)
96 - 346	No	304 ± 150 (79.0 - 98.1)	55.6 ± 44.8 (80.0 - 99.6)	60.1 ± 28.8 (79.0 - 92.1)	8.6 ± 0.7 (97.1 - 100)	-	Partial	(Boonsook et al., 2003)
130 - 210	Yes	148 (95)	106 (90)	65 (62)	9.6 (91)	-	Partial	(Sato et al., 2002)
96 - 346	64000 Lm ³ d ⁻¹ , 7 m 21 d	-	575 ± 191 (88.0 - 99.8)	52.0 ± 9.1 to 60.1 ± 28.8 (75.2 - 95.1)	6.3 ± 2.3 to 8.6 ± 0.7 (92.5 - 100)	575 ± 191 (88.0 - 99.8)	At higher HLR	(Luannanee et al., 2002c)
100 - 600	4000 Lm ³ d ⁻¹ , 7 m 21 d 20000 Lm ³ d ⁻¹ , 3 m 60 d	287 ± 58 (53.2)	88 ± 31.8 (87.4)	43.5 ± 7.88 (-26.7)	9.13 ± 0.89 (80.3)	-	-	(Luannanee et al., 2002c)
850	No	(27)	(82.10)	(65.30)	(83.00)	-	-	
	No	326.7 ± 131.1 (57.6)	298.3 ± 260.8 (48.2)	280.0 ± 53.8 (68.1)	30.2 ± 0.96 (51.9)	86.3 ± 38.7 (53.0)	326.7 ± 131.1 (57.6)	(Attanandana et al., 2000)
850	When necessary	212.7 ± 36.7 (69.9)	228.3 ± 126.0 (90.3)	372.3 ± 57.1 (90.8)	39.6 ± 10.1 (90.1)	101.7 ± 22.4 (71.2)	212.7 ± 36.7 (69.9)	
850	Periodical	86.1 ± 51.3 (47.9)	153.3 ± 162.0 (52.6)	63.5 ± 20.4 (44.2)	4.9 ± 1.5 (30.5)	34.8 ± 35.1 (21.9)	86.1 ± 51.3 (47.9)	

Fuente: AN et al. *Multi-Soil-Layering Systems for Wastewater Treatment in Small and Remote Communities*. p.138.

Anexo 3. Caracterización piedra cuarta


Piedra 38 mm
(Cuarta) Ochomogo
2005
Ficha técnica

Descripción.
Es un agregado grueso de buena calidad, obtenido a partir de un proceso de trituración, cribado y lavado, para garantizar su distribución granulométrica y la eliminación de limos y arcillas. Tamaño máximo 38 mm.

Litología
Lahar, bloques basálticos en matriz arcillosa.

Aplicaciones
Recomendada para concretos "gruesos" que requieran un tamaño máximo de 38 mm. Se utiliza para drenajes y como material filtrante

Ventajas
En mezclas de concreto, aumentará la resistencia a la compresión, disminuyendo el consumo de cemento, y por lo tanto, optimizando el costo del concreto.



OCHOMOGO

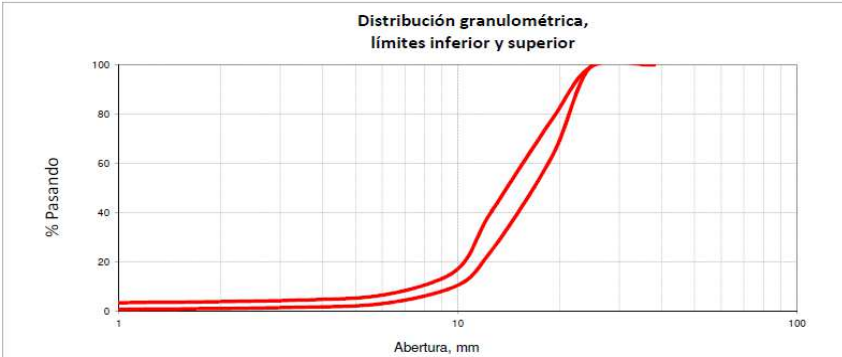
Análisis granulométrico, según INTE 06-02-09-07 (ASTM C 136)

Malla, mm	Límite	
	Inferior	Superior
50 (2")	100	100
38 (1 1/2")	98	100
25 (1")	18	30
19 (3/4")	2	6
9,5 (3/8")	0	1
4,75 (# 4)	0	1
0,075 (# 200)	0	1

Propiedades físicas

Propiedad	Según ensayo INTE (ASTM)	
Humedad evaporable	06-02-36-10 (566)	< 7%
Pérdida por lavado # 200	06-02-12-08 (117)	< 2,0%
Módulo de finura	06-02-09-07 (136)	7.4-7.8
Peso específico	06-02-34-10 (127)	2,45-2,50
Absorción	06-02-34-10 (127)	< 4,7%
Peso unitario	06-02-21-08 (29)	> 1300 kg/m3
Abrasión B	06-02-27-09 (131)	< 30 %
Sanidad	06-02-24-09 (88)	< 10%

Distribución granulométrica, límites inferior y superior



Fuente: QUEBRADOR OCHOMOGO. *Piedra 38 mm (Cuarta)*.

<http://ochomogocr.com/producto/piedra-38-mm-cuarta>. Consulta: 10 de enero de 2021.

Anexo 4. Caracterización piedra quintilla

Piedra 12,5 mm (Quintilla) 2001	Ficha técnica																											
	<p>Descripción. Es un agregado grueso de primera calidad, obtenido a partir de un proceso de trituración de roca sólida, luego, cribado y lavado, para garantizar su distribución granulométrica y la eliminación de limos y arcillas. Tamaño máximo 12,5 mm.</p>																											
	<p>Litología Lahar, bloques basáltico en matriz arcillosa.</p>																											
	<p>Aplicaciones Recomendada para concretos estructurales, finos y de rellenos, donde las condiciones de colocación requieren un concreto que fluya adecuadamente por el acero, formaletas y espacios confinado .</p>																											
	<p>Ventajas En mezclas de concreto evita los problemas de llenado y formación de vacíos dentro de los elementos estructurales. Por su forma y graduación mejora la curva granulométrica de las mezclas, obteniendo una mayor trabajabilidad y optimización en el uso de cemento. Es ideal para concretos fluidos y bombeados.</p>																											
	<p>* Granulometría.</p>																											
	<p>Análisis granulométrico, según INTE 06-02-09-07 (ASTM C 136)</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th rowspan="2" style="background-color: #f4a460;">Malla, mm</th> <th colspan="2" style="background-color: #f4a460;">Límite</th> </tr> <tr> <th style="background-color: #f4a460;">Inferior</th> <th style="background-color: #f4a460;">Superior</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>12,5 (1/2")</td> <td>96</td> <td>100</td> </tr> <tr> <td>9,5 (3/8")</td> <td>71</td> <td>88</td> </tr> <tr> <td>4,75 (#4)</td> <td>12</td> <td>28</td> </tr> <tr> <td>2,36 (#8)</td> <td>0</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>1,16 (#16)</td> <td>0</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>0,075 (#200)</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>		Malla, mm	Límite		Inferior	Superior	12,5 (1/2")	96	100	9,5 (3/8")	71	88	4,75 (#4)	12	28	2,36 (#8)	0	4	1,16 (#16)	0	2	0,075 (#200)	0	1			
	Malla, mm	Límite																										
		Inferior	Superior																									
	12,5 (1/2")	96	100																									
9,5 (3/8")	71	88																										
4,75 (#4)	12	28																										
2,36 (#8)	0	4																										
1,16 (#16)	0	2																										
0,075 (#200)	0	1																										
<p>Propiedades físicas</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="background-color: #f4a460;">Propiedad</th> <th colspan="2" style="background-color: #f4a460;">Según ensayo INTE (ASTM)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Humedad evaporable</td> <td>06-02-36-10 (C 566)</td> <td>< 8%</td> </tr> <tr> <td>Pérdida por lavado # 200</td> <td>06-02-12-08 (C 117)</td> <td>< 2,5,0%</td> </tr> <tr> <td>Módulo de finura</td> <td>06-02-09-07 (C 136)</td> <td>5,50-6,20</td> </tr> <tr> <td>Peso específico</td> <td>06-02-34-10 (C 127)</td> <td>< 2,30</td> </tr> <tr> <td>Absorción</td> <td>06-02-34-10 (C 127)</td> <td>< 5,00%</td> </tr> <tr> <td>Peso unitario</td> <td>06-02-21-08 (C 29)</td> <td>> 1250 kg/m3</td> </tr> <tr> <td>Abrasión C</td> <td>06-02-22-09 (C 40)</td> <td>< 30</td> </tr> <tr> <td>Sanidad</td> <td>06-02-24-09 (C 88)</td> <td>< 10%</td> </tr> </tbody> </table>		Propiedad	Según ensayo INTE (ASTM)		Humedad evaporable	06-02-36-10 (C 566)	< 8%	Pérdida por lavado # 200	06-02-12-08 (C 117)	< 2,5,0%	Módulo de finura	06-02-09-07 (C 136)	5,50-6,20	Peso específico	06-02-34-10 (C 127)	< 2,30	Absorción	06-02-34-10 (C 127)	< 5,00%	Peso unitario	06-02-21-08 (C 29)	> 1250 kg/m3	Abrasión C	06-02-22-09 (C 40)	< 30	Sanidad	06-02-24-09 (C 88)	< 10%
Propiedad	Según ensayo INTE (ASTM)																											
Humedad evaporable	06-02-36-10 (C 566)	< 8%																										
Pérdida por lavado # 200	06-02-12-08 (C 117)	< 2,5,0%																										
Módulo de finura	06-02-09-07 (C 136)	5,50-6,20																										
Peso específico	06-02-34-10 (C 127)	< 2,30																										
Absorción	06-02-34-10 (C 127)	< 5,00%																										
Peso unitario	06-02-21-08 (C 29)	> 1250 kg/m3																										
Abrasión C	06-02-22-09 (C 40)	< 30																										
Sanidad	06-02-24-09 (C 88)	< 10%																										
<p style="text-align: center;">Distribución granulométrica, límites inferior y superior</p>																												

Fuente: QUEBRADOR OCHOMOGO. *Piedra 12.5 mm (Quintilla)*.

<http://ochomogocr.com/producto/piedra-125-mm-quintilla>. Consulta: 10 de enero de 2021.

Anexo 5. Especificaciones del carbón activado utilizado por AyA

CARBÓN ACTIVADO PULVERIZADO

El carbón activado pulverizado, es utilizado como absorbente en diferentes procesos de potabilización para la eliminación de contaminantes color, hidrocarburos, entre otros. Por lo tanto, no debe contener ningún material o sustancia capaz de producir efectos nocivos o perjudiciales a la salud pública.

Debe cumplir obligatoriamente con la norma **NSF/ANSI Standard 61 y AWWA B-600-última versión**, ambas de los Estados Unidos de Norte América.

REQUISITOS FÍSICOQUÍMICOS:

- El proceso de activación deberá ser físico.
- Deberá estar libre de impurezas o cenizas.
- Deberá provenir de madera proveniente de reforestaciones con fines industriales.
- Número de Yodo, mgI₂/g CA: Mayor a 500.
- Densidad aparente, g/ml: Entre 0.20 y 0.75.
- Humedad, %: Menor a 8.0 %.
- pH 6 a 8

Granulometría	U.S. Standard
Malla N°	% que pasa
100	99.00
200	95.00
325	90.00

DOCUMENTOS POR APORTAR

- El Oferente debe aportar una impresión de la página web oficial de la NSF (<http://www.nsf.org/>) que permita demostrar que el producto ofertado cumple y está incluido de la lista de certificados por la norma NSF **NSF/ANSI STANDARD 61**. La impresión debe ser preferiblemente del mismo día de apertura de ofertas, pero a lo sumo se aceptará del día anterior. La información se verificará en la página WEB oficial de la NSF. <http://www.nsf.org/>
- El Oferente debe aportar un detalle completo de la especificación fisicoquímica que cumple el producto cotizado.
- El Oferente debe aportar una Declaración Jurada, donde manifieste que el producto ofertado cumple con lo especificado en la norma internacional AWWA B600- última versión.
- El Adjudicatario debe aportar un documento del Fabricante del producto entregado en el cual indique que cumple con la norma internacional AWWA B600-última versión.
- El Adjudicatario debe aportar copia original impresa de las normas AWWA B600 y B604, toda la última versión.

Continuación anexo 5

EMPAQUE:

El producto deberá venir empacado en sacos de 20 a 25 **kilogramos** c/u, con triple capa de papel kraft y bolsa interior de polietileno, el cual debe ser altamente resistente, de tal manera que se eviten contaminaciones y derramamientos durante su transporte y almacenamiento.

Cada saco debe presentar un Etiquetado Impreso Original de Fabrica conteniendo preferiblemente la siguiente información:

- Nombre del producto
- Nombre del Fabricante
- Norma AWWA-B100 (última versión)
- Símbolo y Numero de la Naciones Unidas
- Símbolo norma NFPA
- Peso Neto
- País de origen
- Dirección
- Teléfono

VIGENCIA

El producto entregado debe tener una fecha de fabricación máxima de seis meses antes de la fecha de entrega.

TRANSPORTE, MANIPULACIÓN Y DESCARGA

- Durante el transporte y manipulación, el material deberá estar protegido contra las inclemencias climáticas que puedan dañarlo o contaminarlo.
- El contratista está obligado a acatar y cumplir todas las indicaciones de la Legislación y Reglamentación Nacional vigente en materia Sustancias Peligrosas, por lo tanto, es el único responsable civil o penalmente por el producto.
- El contratista será el responsable de implementar las medidas de seguridad necesarias durante el transporte del producto.
- El contratista está obligado a tomar todas aquellas medidas y acciones necesarias para poner fin de forma inmediata a cualquier causa de riesgo para la Salud Pública o bienes de Terceras Personas.
- El producto podrá ser entregado entarimado y recubierto con plástico apropiado "*paletizado*" para su protección.
- El contratista es responsable de **descargar y acomodar** los tambores donde lo determine la Institución.

Fuente: AyA. *Especificaciones técnicas para compra de carbon activado*. pp.1-2.

Anexo 6. Especificaciones de la antracita utilizada por AyA

ANTRACITA

El material de antracita será utilizado como medio filtrante para el proceso de potabilización de aguas de consumo humano, por lo tanto, no debe contener ningún material o sustancia capaz de producir efectos nocivos o perjudiciales a la salud pública.

Debe cumplir obligatoriamente con la norma ANSI AWWA-B-100 (última versión) Filtering Material, de los Estados Unidos de Norte América.

REQUISITOS FISICOQUÍMICOS

Característica	Valor
Tamaño Efectivo, mm	0.80 a 1.10
Coefficiente de Uniformidad	≤ 1.5
Tamaño más fino, mm	0.59
Tamaño más grueso, mm	2.0
Gravedad específica	1.45 a 1.65
Dureza: de la Escala de Mohs.	≥ 2.7
Solubilidad en ácido clorhídrico al 40%, durante 24 horas:	$\leq 3\%$

DOCUMENTACIÓN

- El Oferente debe aportar una **Declaración Jurada**, donde manifieste con toda propiedad que el producto ciertamente cumple con las normas internacionales **AWWA B100 (última versión) Filtering Material'**.
- El Oferente debe indicar país de procedencia, fabricante, nombre comercial del producto, especificaciones técnicas del fabricante y hoja de seguridad del fabricante (MSDS).
- El Adjudicatario debe entregar en original la norma **AWWA B100-09** (o la última versión vigente al momento de la entrega).

EMPAQUE

El material deberá venir empacado en sacos de 20 a 30 kg c/u, de polietileno altamente resistente o superior, de tal manera que se eviten contaminaciones, rupturas y derramamientos

Continuación anexo 6.

durante su transporte y almacenamiento. El producto se entregará **entarimado** y recubierto con plástico apropiado para su protección.

Cada saco debe presentar un Etiquetado Impreso Original de Fabrica conteniendo preferiblemente la siguiente información:

- Nombre del producto
- Nombre del Fabricante
- Norma AWWA-B100 (última versión)
- Símbolo y Numero de la Naciones Unidas
- Símbolo norma NFPA
- Peso Neto
- País de origen

ANÁLISIS DE LABORATORIO DE AYA:

- La Institución se reserva el derecho de efectuar análisis fisicoquímicos al producto entregado; los resultados de los análisis realizados por la Institución (AyA) y debidamente comunicados al proveedor, serán los que tengan validez legal.

TRANSPORTE, MANIPULACIÓN Y DESCARGA

- Durante el transporte y manipulación, el material deberá estar protegido contra las inclemencias climáticas que puedan dañarlo o contaminarlo.
- El Adjudicatario está obligado a acatar y cumplir todas las indicaciones de la Legislación y Reglamentación Nacional vigente en materia Sustancias Peligrosas, por lo tanto, es el único responsable civil o penalmente por el producto.
- El Adjudicatario será el responsable de implementar las medidas de seguridad necesarias durante el transporte del producto.
- El Adjudicatario está obligado a tomar todas aquellas medidas y acciones necesarias para poner fin de forma inmediata a cualquier causa de riesgo para la Salud Pública o bienes de Terceras Personas.
- El producto se entregará entarimado y recubierto con plástico apropiado "*paletizado*" para su protección

Continuación anexo 6.

- El Adjudicatario es responsable de descargar y acomodar los sacos de antracita donde lo determine la Institución.

Fuente: AyA. *Especificaciones técnicas para compra de antracita*. pp.1-2.

