



UNIVERSIDAD JOSÉ CARLOS MARIÁTEGUI

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y
ARQUITECTURA**

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

T E S I S

**EVALUACIÓN DE TRES SISTEMAS DE DEPURACIÓN PARA DETERMINAR
SU EFICIENCIA EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES
DOMÉSTICAS EN MOQUEGUA, AÑO 2017**

PRESENTADO POR

**BACHILLER CÁCERES POMA, DEYBI KARIN
BACHILLER CALISAYA VERA, GISELA MILAGROS**

ASESOR:

DR. EDGAR VIRGILIO BEDOYA JUSTO

PARA OPTAR TÍTULO PROFESIONAL DE

INGENIERO AMBIENTAL

MOQUEGUA – PERÚ

2018

CONTENIDO

	Pág.
Página de jurado.....	i
Dedicatoria.....	ii
Agradecimientos.....	iv
Contenido.....	vi
ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xvii
ÍNDICE DE APÉNDICES.....	xx
RESUMEN.....	xxi
ABSTRACT.....	xxii
INTRODUCCIÓN.....	xxiii

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Descripción de la realidad del problema.....	1
1.2 Definición del problema.....	3
1.2.1 Problema general.....	3
1.2.2 Problemas derivados o específicos.....	3
1.3 Objetivos de la investigación.....	4
1.3.1 Objetivo general.....	4
1.3.2 Objetivos específicos.....	4
1.4 Justificación.....	4
1.4.1 Económica.....	4
1.4.2 Social.....	5
1.4.3 Ambiental.....	5
1.4.1 Legal.....	5
1.5 Alcances y limitaciones.....	6
1.5.1 Alcances.....	6
1.5.2 Limitaciones.....	6
1.6 Variables.....	7

1.6.1	Variable independiente.....	7
1.6.2	Variable dependiente.....	7
1.6.3	Operacionalización de variables.....	7
1.7	Hipótesis de la investigación.....	8
1.7.1	Hipótesis general.....	8
1.7.2	Hipótesis específicas o derivadas.....	8

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1	Antecedentes de la investigación.....	9
2.1.1	Antecedentes internacionales.....	9
2.1.2	Antecedentes nacionales.....	11
2.1.3	Antecedentes regionales y locales.....	11
2.2	Bases teóricas.....	12
2.2.1	Revisión de literatura.....	12
2.2.2	Marco legal.....	38
3.1	Definición de términos.....	41

CAPÍTULO III

MÉTODO

3.1	Tipo de la investigación.....	43
3.2	Diseño de la investigación.....	43
3.2.1	Tratamiento preliminar.....	43
3.2.2	Fase de tratamiento con lombrices (<i>Eisenia foetida</i>).....	44
3.2.3	Fase de tratamiento con jacinto de agua (<i>Eichhornia crassipes</i>).....	46
3.2.4	Fase de tratamiento con hipoclorito de calcio: $\text{Ca}(\text{ClO})_2$	47
3.3	Población y muestra.....	50
3.3.1	Población.....	50
3.3.2	Muestra.....	50
3.4	Descripción de instrumentos para recolección de datos.....	50
3.4.1	Técnica para la recolección de datos.....	50
3.4.2	Instrumentos para la recolección de datos.....	50

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1	Presentación de resultados.....	54
4.1.1	Características físicas, químicas y microbiológicas del afluente	54
4.1.2	Aplicación de los sistemas propuestos	55
4.1.3	Características físicas, químicas y microbiológicas del efluente a la salida de cada sistema de tratamiento.....	118
4.2	Contrastación de hipótesis	138
4.2.1	Hipótesis general	138
4.2.2	Hipótesis específicas	138
4.3	Discusión de resultados	139

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1	Conclusiones.....	149
5.2	Recomendaciones	150
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	152
	APÉNDICE.....	162
	MATRIZ DE CONSISTENCIA	
	INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Operacionalización de las variables de estudio.....	7
Tabla 2. Principales parámetros de interés en la caracterización de aguas residuales	13
Tabla 3. Clasificación taxonómica de la lombriz roja californiana	18
Tabla 4. Características morfológicas de la lombriz roja californiana.....	19
Tabla 5. Condiciones ambientales para el desarrollo de la lombriz roja californiana	22
Tabla 6. Índices de eficiencia del lombrifiltro dinámico aeróbico	26
Tabla 7. Dosis típicas de cloro en desinfección	32
Tabla 8. Límites máximos permisibles para los efluentes de PTAR	38
Tabla 9. Directrices recomendadas sobre la calidad microbiológica de las aguas residuales empleadas en agricultura	40
Tabla 10. Número de tratamientos con lombrices	45
Tabla 11. Número de tratamientos con jacinto de agua	47
Tabla 12. Número de tratamientos con hipoclorito de calcio	48
Tabla 13. Resultados de la caracterización física, química y microbiológica del afluente	54
Tabla 14. Código y descripción de los sistemas y tratamientos propuestos	55
Tabla 15. Resultados a la salida de la fase de tratamiento con lombrices	56
Tabla 16. Resultados de la temperatura a la salida de la fase de tratamiento con lombrices a los 7 días	58
Tabla 17. Comparación de medias de la temperatura a la salida de la fase de tratamiento con lombrices a los 7 días.....	59
Tabla 18. Análisis de varianza para la temperatura a la salida de la fase de tratamiento con lombrices a los 7 días.....	59
Tabla 19. Prueba de comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador temperatura, a la salida de la fase de tratamiento con lombrices a los 7 días.....	60

Tabla 20. Resultados de los STS a la salida de la fase de tratamiento con lombrices a los 7 días	61
Tabla 21. Comparación de medias de los STS a la salida de la fase de tratamiento con lombrices a los 7 días.....	61
Tabla 22. Análisis de varianza para los STS a la salida de la fase de tratamiento con lombrices a los 7 días.....	62
Tabla 23. Prueba de comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador STS, a la salida de la fase de tratamiento con lombrices a los 7 días...	62
Tabla 24. Resultados del pH a la salida de la fase de tratamiento con lombrices a los 7 días	63
Tabla 25. Comparación de medias del pH a la salida de la fase de tratamiento con lombrices a los 7 días.....	64
Tabla 26. Análisis de varianza para el pH a la salida de la fase de tratamiento con lombrices a los 7 días.....	64
Tabla 27. Prueba de comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador pH, a la salida de la fase de tratamiento con lombrices a los 7 días.....	65
Tabla 28. Resultados de la DBO ₅ a la salida de la fase de tratamiento con lombrices a los 7 días	66
Tabla 29. Comparación de medias de la DBO ₅ a la salida de la fase de tratamiento con lombrices a los 7 días.....	66
Tabla 30. Análisis de varianza para la DBO ₅ a la salida de la fase de tratamiento con lombrices a los 7 días	67
Tabla 31. Prueba de comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador DBO ₅ , a la salida de la fase de tratamiento con lombrices a los 7 días ..	67
Tabla 32. Resultados de las coliformes termotolerantes a la salida de la fase de tratamiento con lombrices a los 7 días.....	68
Tabla 33. Comparación de medias de las coliformes termotolerantes a la salida de la fase de tratamiento con lombrices a los 7 días.....	69
Tabla 34. Análisis de varianza para las coliformes termotolerantes a la salida de la fase de tratamiento con lombrices a los 7 días.....	69

Tabla 35. Prueba de comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador coliformes termotolerantes, a la salida de la fase de tratamiento con lombrices a los 7 días.....	70
Tabla 36. Resultados a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 7 días	71
Tabla 37. Resultados de la temperatura a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 7 días.....	73
Tabla 38. Comparación de medias de la temperatura a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 7 días	73
Tabla 39. Análisis de varianza para la temperatura a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 7 días	74
Tabla 40. Prueba de comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador temperatura, a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 7 días.....	74
Tabla 41. Resultados de los STS a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 7 días	76
Tabla 42. Comparación de medias de los STS a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 7 días	76
Tabla 43. Análisis de varianza para los STS a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 7 días	77
Tabla 44. Prueba de comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador STS, a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 7 días.....	77
Tabla 45. Resultados del pH a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 7 días.....	78
Tabla 46. Comparación de medias del pH a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 7 días	79
Tabla 47. Análisis de varianza para el pH a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 7 días	79
Tabla 48. Prueba de comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador pH, a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 7 días ...	80

Tabla 49. Resultados de la DBO ₅ a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 7 días	81
Tabla 50. Comparación de medias de la DBO ₅ a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 7 días	81
Tabla 51. Análisis de varianza para la DBO ₅ a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 7 días	82
Tabla 52. Prueba de comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador DBO ₅ , a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 7 días	82
Tabla 53. Resultados de las coliformes termotolerantes a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 7 días	84
Tabla 54. Comparación de medias de las coliformes termotolerantes a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 7 días.....	84
Tabla 55. Análisis de varianza para las coliformes termotolerantes a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 7 días	85
Tabla 56. Prueba de comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador coliformes termotolerantes, a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 7 días	85
Tabla 57. Resultados a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 14 días	87
Tabla 58. Resultados de la temperatura a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 14 días.....	89
Tabla 59. Comparación de medias de la temperatura a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 14 días.....	89
Tabla 60. Análisis de varianza para la temperatura a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 14 días	90
Tabla 61. Prueba de comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador temperatura, a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 14 días	90
Tabla 62. Resultados de los STS a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 14 días	92

Tabla 63. Comparación de medias de los STS a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 14 días.....	92
Tabla 64. Análisis de varianza para los STS a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 14 días.....	93
Tabla 65. Prueba de comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador STS, a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 14 días.....	93
Tabla 66. Resultados del pH a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 14 días.....	94
Tabla 67. Comparación de medias del pH a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 14 días	95
Tabla 68. Análisis de varianza para el pH a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 14 días	95
Tabla 69. Resultados de la DBO ₅ a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 14 días	96
Tabla 70. Comparación de medias de la DBO ₅ a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 14 días	97
Tabla 71. Análisis de varianza para la DBO ₅ a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 14 días	97
Tabla 72. Prueba de comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador DBO ₅ , a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 14 días.....	98
Tabla 73. Resultados de las coliformes termotolerantes a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 14 días	99
Tabla 74. Comparación de medias de las coliformes termotolerantes a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 14 días.....	99
Tabla 75. Análisis de varianza para las coliformes termotolerantes a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 14 días	100
Tabla 76. Prueba de comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador coliformes termotolerantes, a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 14 días	100

Tabla 77. Resultados a la salida de la fase de tratamiento con hipoclorito de calcio.....	102
Tabla 78. Resultados de la temperatura a la salida de la fase de tratamiento con hipoclorito de calcio	104
Tabla 79. Comparación de medias de la temperatura a la salida de la fase de tratamiento con hipoclorito de calcio	104
Tabla 80. Análisis de varianza para la temperatura a la salida de la fase de tratamiento con hipoclorito de calcio	105
Tabla 81. Prueba de comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador temperatura, a la salida de la fase de tratamiento con hipoclorito de calcio.....	105
Tabla 82. Resultados de los STS a la salida de la fase de tratamiento con hipoclorito de calcio	107
Tabla 83. Comparación de medias de los STS a la salida de la fase de tratamiento con hipoclorito de calcio.....	107
Tabla 84. Análisis de varianza para los STS a la salida de la fase de tratamiento con hipoclorito de calcio.....	108
Tabla 85. Prueba de comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador STS a la salida de la fase de tratamiento con hipoclorito de calcio....	108
Tabla 86. Resultados del pH a la salida de la fase de tratamiento con hipoclorito de calcio.....	109
Tabla 87. Comparación de medias del pH a la salida de la fase de tratamiento con hipoclorito de calcio.....	110
Tabla 88. Análisis de varianza para el pH a la salida de la fase de tratamiento con hipoclorito de calcio.....	110
Tabla 89. Prueba de comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador pH, a la salida de la fase de tratamiento con hipoclorito de calcio.....	111
Tabla 90. Resultados de la DBO ₅ a la salida de la fase de tratamiento con hipoclorito de calcio	112
Tabla 91. Comparación de medias de la DBO ₅ a la salida de la fase de tratamiento con hipoclorito de calcio	112

Tabla 92. Análisis de varianza para la DBO ₅ a la salida de la fase de tratamiento con hipoclorito de calcio.....	113
Tabla 93. Prueba de comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador DBO ₅ , a la salida de la fase de tratamiento con hipoclorito de calcio..	113
Tabla 94. Resultados de las coliformes termotolerantes a la salida de la fase de tratamiento con hipoclorito de calcio.....	115
Tabla 95. Comparación de medias de las coliformes termotolerantes a la salida de la fase de tratamiento con hipoclorito de calcio	115
Tabla 96. Análisis de varianza para las coliformes termotolerantes a la salida de la fase de tratamiento con hipoclorito de calcio	116
Tabla 97. Prueba de comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador coliformes termotolerantes, a la salida de la fase de tratamiento con hipoclorito de calcio	116
Tabla 98. Resultados de la temperatura a la salida de cada sistema de tratamiento	118
Tabla 99. Comparación de medias de la temperatura entre sistemas de tratamiento	119
Tabla 100. Análisis de varianza para la temperatura entre sistemas de tratamiento.....	119
Tabla 101. Prueba de comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador temperatura, entre sistemas de tratamiento.....	120
Tabla 102. Resultados de los STS a la salida de cada sistema de tratamiento....	121
Tabla 103. Comparación de medias de los STS entre sistemas de tratamiento ..	122
Tabla 104. Análisis de varianza para los STS entre sistemas de tratamiento	122
Tabla 105. Prueba de comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador STS, entre sistemas de tratamiento	123
Tabla 106. Resultados del pH a la salida de cada sistema de tratamiento	124
Tabla 107. Comparación de medias del pH entre sistemas de tratamiento.....	125
Tabla 108. Análisis de varianza para el pH entre sistemas de tratamiento	125
Tabla 109. Prueba de comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador pH, entre sistemas de tratamiento	126

Tabla 110. Resultados de la DBO ₅ a la salida de cada sistema de tratamiento...	127
Tabla 111. Comparación de medias de la DBO ₅ entre sistemas de tratamiento .	128
Tabla 112. Análisis de varianza para la DBO ₅ entre sistemas de tratamiento	128
Tabla 113. Prueba de comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador DBO ₅ , entre sistemas de tratamiento	129
Tabla 114. Resultados de las coliformes termotolerantes a la salida de cada sistema de tratamiento	130
Tabla 115. Comparación de medias de las coliformes termotolerantes entre sistemas de tratamiento	131
Tabla 116. Análisis de varianza para las coliformes termotolerantes entre sistemas de tratamiento	132
Tabla 117. Prueba de comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador coliformes termotolerantes, entre sistemas de tratamiento	132
Tabla 118. Grado de reducción de la temperatura a la salida de cada sistema de tratamiento	134
Tabla 119. Porcentaje de remoción de STS a la salida de cada sistema de tratamiento.....	135
Tabla 120. Incremento del pH a la salida de cada sistema de tratamiento.....	136
Tabla 121. Porcentaje de remoción de la DBO ₅ a la salida de cada sistema de tratamiento.....	136
Tabla 122. Porcentaje de remoción de coliformes termotolerantes a la salida de cada sistema de tratamiento.....	137

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Morfología de la lombriz roja californiana.....	18
Figura 2. Subproductos de la aplicación de la lombricultura en la depuración de aguas residuales	23
Figura 3. Corte esquemático del sistema de tratamiento con <i>Eisenia foetida</i>	24
Figura 4. Morfología del jacinto de agua	28
Figura 5. Curva generalizada obtenida durante la cloración al breakpoint.....	33
Figura 6. Supervivencia de coliformes en un reactor de alimentación discontinua	34
Figura 7. Diseño de la investigación	49
Figura 8. Comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador temperatura, a la salida de la fase de tratamiento con lombrices a los 7 días	60
Figura 9. Comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador STS, a la salida de la fase de tratamiento con lombrices a los 7 días	63
Figura 10. Comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador pH, a la salida de la fase de tratamiento con lombrices a los 7 días	65
Figura 11. Comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador DBO ₅ , a la salida de la fase de tratamiento con lombrices a los 7 días	68
Figura 12. Comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador coliformes termotolerantes, a la salida de la fase de tratamiento con lombrices a los 7 días	70
Figura 13. Comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador temperatura, a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 7 días..	75
Figura 14. Comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador STS, a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 7 días	78
Figura 15. Comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador pH, a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 7 días	80
Figura 16. Comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador DBO ₅ , a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 7 días	83

Figura 17. Comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador coliformes termotolerantes, a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 7 días	86
Figura 18. Comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador temperatura, a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 14 días ..	91
Figura 19. Comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador STS, a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 14 días	94
Figura 20. Comparación de medias del indicador pH, a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 14 días.....	96
Figura 21. Comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador DBO ₅ , a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 14 días	98
Figura 22. Comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador coliformes termotolerantes, a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 14 días	101
Figura 23. Comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador temperatura, a la salida de la fase de tratamiento con hipoclorito de calcio	106
Figura 24. Comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador STS, a la salida de la fase de tratamiento con hipoclorito de calcio.....	109
Figura 25. Comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador pH, a la salida de la fase de tratamiento con hipoclorito de calcio.....	111
Figura 26. Comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador DBO ₅ , a la salida de la fase de tratamiento con hipoclorito de calcio.....	114
Figura 27. Comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador coliformes termotolerantes, a la salida de la fase de tratamiento con hipoclorito de calcio	117
Figura 28. Comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador temperatura, entre sistemas de tratamiento	120
Figura 29. Comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador STS, entre sistemas de tratamiento	123
Figura 30. Comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador pH, entre sistemas de tratamiento	126

Figura 31. Comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador DBO ₅ , entre sistemas de tratamiento	130
Figura 32. Comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador coliformes termotolerantes, entre sistemas de tratamiento	133

ÍNDICE DE APÉNDICES

	Pág.
Apéndice A: Panel fotográfico	162
Apéndice B: Grado de reducción de cada parámetro de evaluación por sistema de tratamiento	167
Apéndice C: Resultados de los análisis de laboratorio	

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo evaluar tres sistemas de depuración, para determinar su eficiencia en el tratamiento de aguas residuales domésticas en Moquegua, año 2017. El afluente, punto de partida para esta investigación, fue tomado a la salida de las lagunas de estabilización de San Antonio, y en paralelo, se analizaron los parámetros físicos, químicos y microbiológicos considerados para determinar su estado inicial. Este afluente – previo proceso de pre-sedimentación– pasó a través de los tres sistemas propuestos: el primero con *Eisenia foetida*, el segundo con *Eisenia foetida* + *Eichhornia crassipes*, y el tercero con *Eisenia foetida* + *Eichhornia crassipes* + $\text{Ca}(\text{ClO})_2$. *Eisenia foetida*, a su vez, fue evaluada en función de distintas tasas de riego: A₁ (0,5 [m³/día]/m²), A₂ (1 [m³/día]/m²) y A₀ (grupo control); *Eichhornia crassipes* en función del tiempo de retención: B₁ (7 días), B₂ (14 días) y B₀ (grupo control); y $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ en función de C₁ (aplicación de hipoclorito de calcio) y C₀ (grupo control); cada uno con dos repeticiones, aplicándose el análisis de varianza (ANVA) como prueba estadística, y la prueba de Tukey. Así, el análisis de los resultados obtenidos permitió determinar como el sistema más eficiente al conformado por *Eisenia foetida* + *Eichhornia crassipes*, cuyo efluente presentó un descenso medio de 5 °C, 94,48 % de sólidos totales en suspensión, 98,41 % de DBO₅ y 100,00 % de coliformes termotolerantes, con un pH promedio de 7,51. Este sistema presentó, a su vez, mejores resultados para A₂B₂: tasa de riego de 1 (m³/día)/m², con 14 días de retención.

Palabras clave: tratamiento de agua residual, *Eisenia foetida*, *Eichhornia crassipes*, hipoclorito de calcio

ABSTRACT

The present research work has as objective to evaluate three depuration systems, to determine their efficiency in the treatment of domestic wastewater in Moquegua, year 2017. The tributary, starting point for this investigation, was taken at the exit of the San Antonio Stabilization Lagoons, and in parallel, the physical, chemical and microbiological parameters considered were analyzed to determine their initial state. This tributary –previous pre-sedimentation process– passed through the three proposed systems: the first with *Eisenia foetida*, the second with *Eisenia foetida* + *Eichhornia crassipes*, and the third with *Eisenia foetida* + *Eichhornia crassipes* + Ca(ClO)₂. *Eisenia foetida*, in turn, was evaluated according to different irrigation rates: A₁ (0,5 [m³/day]/m²), A₂ (1 [m³/day]/m²) and A₀ (control group); *Eichhornia crassipes* was evaluated in function of retention time: B₁ (7 days), B₂ (14 days) and B₀ (control group); and Ca(ClO)₂ was evaluated in function of C₁ (application of calcium hypochlorite) and C₀ (control group); each one with two repetitions, applying the analysis of variance (ANOVA) as statistical test, and the Tukey test. In this way, the analysis of the results obtained allowed us to determine as the most efficient system to the formed by *Eisenia foetida* + *Eichhornia crassipes*, whose effluent showed an average decrease of 5 °C, 94,48 % of total suspended solids, 98,41 % of BOD₅ and 100 % of thermotolerant coliforms, with an average pH of 7,51. This system presented, in turn, better results for A₂B₂: irrigation rate of 1 (m³/day)/m², with 14 days of retention.

Key words: wastewater treatment, *Eisenia foetida*, *Eichhornia crassipes*, calcium hypochlorite

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, el aumento de la población mundial y el creciente desarrollo urbano e industrial han traído como consecuencia el incremento de la contaminación ambiental, por lo que en la actualidad, la protección del medio ambiente se ha convertido en un aspecto fundamental para lograr un desarrollo global integral y sostenible, formándose mayor conciencia de que debemos cuidarlo y protegerlo.

Precisamente, uno de los principales problemas de contaminación con el que nos enfrentamos hoy en día es el inadecuado manejo de las aguas residuales domésticas, cuyo vertimiento a cuerpos de agua y su reutilización, sin un tratamiento previo adecuado, constituye no sólo un problema de contaminación de los recursos hídricos y la pérdida de ecosistemas, sino también un riesgo para la salud pública y la alteración del bienestar de la población.

Así mismo, los sistemas convencionales actuales de tratamiento de aguas residuales, a pesar de su probada eficacia, implican altos costos de construcción, operación y mantenimiento, requieren de personal calificado y generan subproductos indeseables (lodos), por lo cual su aplicación no siempre es factible en todos los casos ni ámbitos geográficos.

Ante esta problemática, la capacidad del medio natural para depurar el agua residual y su potencial reutilización, abre una gama de posibilidades de tratamientos naturales que se muestran como una promisoriosa alternativa tecnológica (Cifuentes y Sartor, 2012). El efecto depurador de microorganismos y especies vegetales ha sido motivo de estudio para diversos autores; destacándose entre ellos el empleo de macrófitas flotantes y, particularmente, el de *Eichhornia*

crassipes debido a su alta eficiencia en la remoción de nutrientes, materia orgánica, organismos patógenos y metales pesados (Martelo y Lara, 2012; Valderrama, 1996). Por otra parte, en la década de los noventa, las investigaciones del Dr. José Tohá se consolidan con la construcción de la primera planta de tratamiento de aguas residuales conformada por un filtro estratificado y lombrices (Fajardo, 2013, citado por Coronel, 2015).

No obstante, el contenido de microorganismos potencialmente problemáticos del agua residual implica la necesidad de emplear un método que pueda aportar un grado de tratamiento mayor que el dado por un proceso secundario, y más si el efluente pretende reutilizarse; ante ello, la cloración se presenta como un método ampliamente utilizado por su coste favorable, eficacia y sencillez.

Por tal motivo, y atendiendo a la situación señalada en los párrafos anteriores, es que el desarrollo de la presente investigación tiene como propósito evaluar, en nuestra localidad, la eficiencia de tres sistemas de depuración de aguas residuales, alternativos a los sistemas convencionales y mayormente ecológicos, cuya instalación, operación y mantenimiento implicarían un bajo coste, y cuya factibilidad de aplicación contribuiría a solucionar la problemática antes descrita.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Descripción de la realidad del problema

Durante los últimos años, se ha visto agravado el problema del tratamiento de las aguas residuales domésticas, y el aumento de la población ha hecho que el vertido de aguas contaminadas al medio sea una de las principales cuestiones ambientales a la que nos enfrentamos actualmente.

Se estima que a nivel mundial, más del 80 % de las aguas residuales (e incluso más del 95 % en algunos países en desarrollo) son vertidas al medio ambiente sin ningún tipo de tratamiento (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura [UNESCO], 2017).

Esa es una realidad cada vez más cierta para Latinoamérica, donde tres cuartas partes de las aguas fecales o residuales vuelven a los ríos y otras fuentes hídricas sin ser tratadas, creando un serio problema de salud pública y para el medio ambiente (Banco Mundial, 2015).

Esta situación tampoco es ajena a nuestro país, donde, según el Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental [OEFA] (2014a), de las 50 Entidades Prestadoras de Servicios (EPS) de Saneamiento que brindan el servicio de

alcantarillado a nivel nacional, sólo se da cobertura al 69,65 % de la población urbana; por lo que la población no cubierta vierte sus aguas residuales de forma directa y sin tratamiento alguno a los cuerpos de agua natural (mar, ríos, lagos), quebradas, terrenos baldíos, o las emplean para el riego de cultivos, lo que representa un riesgo para la salud y el ambiente.

A su vez, en aquellas zonas del país donde se cuenta con cobertura, 2,2 millones de metros cúbicos de aguas residuales son descargados a la red de alcantarillado de las EPS cada día, pero sólo el 32 % de éstas recibe tratamiento (OEFA, 2014b). Así mismo, en aquellas plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) cuya infraestructura es insuficiente [o ya se han excedido los caudales de diseño], se presentan problemas de sobrecarga, lo cual origina que los efluentes no se traten adecuadamente, excedan los límites máximos permisibles (LMP), y no se cumpla con los estándares de calidad ambiental (ECA). Esto genera problemas ambientales, como la contaminación de los cuerpos de agua, la presencia de vectores y la generación de malos olores que causan conflictos con la población (OEFA, 2014a).

Específicamente en nuestra región, según el Gobierno Regional Moquegua (s. f.), el porcentaje de tratamiento de agua residual alcanza apenas el 27,96 %. Como se indica en el Plan Regional de Saneamiento 2013-2021, en la región se encuentra una escasa cobertura de tratamiento de las aguas residuales, debido a la falta de plantas de tratamiento de agua residual, sumado al hecho de que las existentes se encuentran colapsadas o no cuentan con un diseño apropiado como indican las normas sanitarias. En diferentes distritos, las aguas residuales son arrojadas directamente a los ríos o son reutilizadas para el riego, convirtiéndose en focos infecciosos para la salud de las poblaciones, así como para la flora y fauna.

Sin embargo, las aguas residuales domésticas adecuadamente tratadas no sólo pueden disponerse en un cuerpo de agua de forma segura, sino también pueden ser reutilizadas en la actividad agrícola y el riego de áreas verdes recreativas, entre otros, sin representar un riesgo para la salud o el ambiente; evitándose de esta manera los problemas de contaminación, y mitigando el riesgo de propagación de enfermedades infecto-contagiosas.

Ante esta situación, y conociendo que los tratamientos convencionales de aguas residuales requieren grandes superficies para retener el agua, además de costos de instalación, operación y mantenimiento entre moderados a elevados, es que se propone la aplicación de tres sistemas de depuración como una alternativa de tratamiento de aguas residuales domésticas, más económica y amigable con el medio ambiente. Estas técnicas: tratamiento con lombricultura, tratamiento con macrófitas flotantes y cloración, aplicadas al tratamiento de aguas residuales domésticas, constituyen sistemas capaces de remover materia orgánica y microorganismos patógenos, cuya eficiencia pretende ser evaluada en el presente trabajo de investigación.

1.2 Definición del problema

1.2.1 Problema general

¿Será posible evaluar tres sistemas de depuración para determinar su eficiencia en el tratamiento de aguas residuales domésticas?

1.2.2 Problemas derivados o específicos

¿Será posible determinar las características físicas, químicas y microbiológicas del afluente para conocer el estado inicial del agua residual?

¿Será posible aplicar los sistemas propuestos para el tratamiento de aguas residuales domésticas?

¿Será posible determinar la eficiencia de cada uno de los sistemas de tratamiento mediante el análisis y comparación de las características físicas, químicas y microbiológicas del efluente?

1.3 Objetivos de la investigación

1.3.1 Objetivo general

Evaluar tres sistemas de depuración, para determinar su eficiencia en el tratamiento de aguas residuales domésticas.

1.3.2 Objetivos específicos

Determinar las características físicas, químicas y microbiológicas del afluente para conocer el estado inicial del agua residual.

Aplicar los sistemas propuestos para el tratamiento de aguas residuales domésticas.

Analizar y comparar las características físicas, químicas y microbiológicas del efluente a la salida de cada uno de los sistemas de tratamiento.

1.4 Justificación

1.4.1 Económica

De ser factible su aplicación, los sistemas propuestos podrían ser implementados en zonas rurales y en todas aquellas áreas de la localidad que por su lejanía o difícil accesibilidad no se encuentren conectadas al sistema de alcantarillado, lo

cual sería económicamente más factible que conducir el agua residual de estas zonas hacia los sistemas de tratamiento convencionales ya existentes en la ciudad.

1.4.2 Social

De ser factible la aplicación de los sistemas propuestos, se reduciría la contaminación de los cuerpos de agua, la presencia de vectores y focos infecciosos para la salud de la población, y la generación de malos olores; situaciones que originan problemas sanitarios y conflictos con la ciudadanía.

1.4.3 Ambiental

La presente investigación permitirá determinar la factibilidad de la implementación de sistemas de depuración en base a lombrices, macrófitas flotantes y cloración, en el tratamiento eficiente de las aguas residuales domésticas, para su posterior vertimiento seguro o reutilización; lo cual contribuiría a reducir los problemas de contaminación de nuestros cuerpos de agua, flora y fauna. Además de la generación de subproductos, como el humus de lombriz (en vez de lodos inestables), que podría ser usado como abono natural.

1.4.1 Legal

La presente investigación permitirá evaluar la eficiencia de los sistemas propuestos, a fin de contribuir con los mismos en el cumplimiento de los Límites Máximos Permisibles para efluentes de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales, aprobados mediante Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM (cuya exigibilidad está señalada en la Ley N° 28611 - Ley

General del Ambiente), y/o de las Directrices sobre la calidad microbiológica de las aguas residuales empleadas en agricultura, recomendadas por la OMS.

1.5 Alcances y limitaciones

1.5.1 Alcances

El presente estudio tiene como alcance evaluar tres sistemas de depuración para determinar su eficiencia, exclusivamente, en el tratamiento de aguas residuales domésticas; bajo las condiciones climatológicas de la ciudad de Moquegua.

Los aspectos puntuales que comprende la investigación están referidos a la evaluación de los parámetros de calidad para aguas residuales contemplados en la normatividad vigente, luego de los tratamientos propuestos, dentro de los cuales abarca parámetros físicos (temperatura y sólidos totales en suspensión), parámetros químicos (pH y DBO₅) y parámetros microbiológicos (coliformes termotolerantes).

1.5.2 Limitaciones

Debido a la complejidad de realizar un muestreo y el tiempo que demanda lograr que las muestras sean representativas, el presente trabajo se realizará a través de la toma de muestras en las horas de máxima y mínima producción de una de las lagunas de estabilización de la localidad, con el fin de homogeneizar la composición característica de las aguas residuales de la ciudad de Moquegua.

No serán contemplados dentro del estudio la capacidad de absorción y/o remoción de contaminantes o nutrientes por parte de las especies utilizadas en los tratamientos.

1.6 Variables

1.6.1 Variable independiente

Aplicación de tres sistemas de depuración.

1.6.2 Variable dependiente

Eficiencia en el tratamiento de aguas residuales domésticas.

1.6.3 Operacionalización de variables

La operacionalización de las variables se observa la Tabla 1.

Tabla 1

Operacionalización de las variables de estudio

Variable	Subvariable	Indicador	Unidad de medida
Independiente	Tratamiento con lombrices (<i>Eisenia foetida</i>).	Tasa de riego	(m ³ /día)/m ²
	Tratamiento con jacinto de agua (<i>Echhornia crassipes</i>).	Tiempo de retención	días
	Tratamiento con hipoclorito de calcio: Ca(ClO) ₂ .	Dosis de cloro (como cloro activo)	mg/L
Dependiente	Parámetros físicos de calidad de agua residual	Temperatura Sólidos totales en suspensión	°C mg/L
	Parámetros químicos de calidad de agua residual	pH DBO ₅	unidad mg/L
	Parámetros microbiológicos de calidad de agua residual	Coliformes termotolerantes	NMP/100 mL

1.7 Hipótesis de la investigación

1.7.1 Hipótesis general

La evaluación de tres sistemas de depuración permite determinar su eficiencia en el tratamiento de aguas residuales domésticas.

1.7.2 Hipótesis específicas o derivadas

La determinación de las características físicas, químicas y microbiológicas del afluente permite conocer el estado inicial del agua residual.

Es posible aplicar los sistemas propuestos para el tratamiento de aguas residuales domésticas.

El análisis y comparación de las características físicas, químicas y microbiológicas del efluente permite determinar la eficiencia de cada uno de los sistemas de tratamiento.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de la investigación

2.1.1 Antecedentes internacionales

Ramón, León y Castillo (2015), en la Universidad de Pamplona en Colombia, realizaron la investigación titulada *Diseño de un sistema alternativo para el tratamiento de aguas residuales urbanas por medio de la técnica de lombrifiltros utilizando la especie Eisenia foetida*, la cual tuvo como objetivo diseñar y construir un sistema sobre tratamiento de aguas residuales para la ciudad de Pamplona en base al sistema de tratamiento Tohá. Este sistema estuvo conformado por dos lechos de aserrín con lombriz, uno de antracita, uno de piedra triturada y un lecho de piedra de río; y fue alimentado de forma diaria por 90 días, con un caudal mínimo de 0,05 L/min. Los efluentes fueron caracterizados a través de seis parámetros: demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales y volátiles (SST y SSV), oxígeno disuelto, conductividad, pH y temperatura, obteniéndose un 92,06 % de remoción de la DQO, a los 182 días, así como un valor de <20 mg/L de SST.

Ese mismo año, en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo en Ecuador, Coronel (2015) realizó la investigación *Diseño e implementación a*

escala de un biofiltro Tohá en la ESPOCH para la depuración de aguas residuales domésticas procedentes de la comunidad Langos La Nube, cuyo objetivo fue diseñar e implementar a escala de laboratorio un Biofiltro Tohá para la depuración de aguas residuales domésticas procedentes de la comunidad Langos La Nube; el mismo que estuvo conformado en un 30 % por piedra bola y grava, y en un 70 % de aserrín, viruta y humus. Con una capacidad de filtración de 12 L/día, se realizaron tres tratamientos en un período de tres semanas, obteniéndose mayor eficiencia en la remoción de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) en la semana 1, con un 84,38 %, consiguiendo además una reducción del 77,69 % de turbiedad, 68,24 % de amonios, 51,69 % de DQO, 80,00 % de nitratos, 73,47 % de fosfatos y 22,96 % sólidos disueltos totales (TDS), además de un incremento de 0,06 unidades de pH y una reducción de 480 µS/cm en la conductividad.

Por otro lado, con respecto al tratamiento con macrófitas flotantes, en la Universidad Javeriana en Colombia, Valderrama, Campos, Velandia y Zapata (2003), realizaron la investigación titulada *Evaluación del efecto del tratamiento con plantas acuáticas (E. Crassipes, Lemma sp. y L. Laevigatum) en la remoción de indicadores de contaminación fecal en aguas residuales domésticas*, que tuvo como objetivo comparar la eficiencia de estas tres especies y de un sistema de microalgas, para la remoción de coliformes fecales, *E. coli* y colifagos somáticos en aguas residuales domésticas. Para ello utilizaron reactores plásticos de 31 cm de diámetro y 15 cm de profundidad; los cuales fueron alimentados al inicio de las pruebas, no habiendo cosecha de plantas. Los efluentes fueron evaluados cada tres días durante un periodo de 12 días, obteniéndose al sexto día una remoción de

hasta 99 % de coliformes fecales y *E. coli* en todos los tratamientos; y siendo *E. crassipes* la especie más eficiente en la remoción de fagos (91%, a diferencia de 75% en los otros tratamientos).

2.1.2 Antecedentes nacionales

En nuestro país, no se han encontrado antecedentes relacionados a la aplicación de la lombricultura para el tratamiento de aguas residuales domésticas, sin embargo, sí se ha realizado una investigación orientada a la depuración de aguas residuales con macrófitas flotantes, entre ellas el jacinto de agua.

García (2012) desarrolló la investigación *Comparación y evaluación de tres plantas acuáticas para determinar la eficiencia de remoción de nutrientes en el tratamiento de aguas residuales domésticas* en la Universidad Nacional de Ingeniería, cuyo objetivo fue comparar la eficiencia de tres especies de macrófitas (*Azolla filiculoides*, *Lemna minor* y *Eichhornia crassipes*) para la remoción de nutrientes, fósforo y nitrógeno, y evaluar una posible relación entre los tratamientos y las eficiencias de remoción bajo condiciones de flujo continuo (compuesto por tres tanques a flujo lento) y por tandas (en un estanque de 36,0 dm² de área). En este estudio se observó que fue posible remover los nutrientes a un 90 %; determinándose a *Eichhornia crassipes* como la especie más eficiente en la remoción de lodos (50 %, a diferencia de 40 % en los otros tratamientos).

2.1.3 Antecedentes regionales y locales

La presente investigación no tiene antecedentes regionales ni locales conocidos.

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Revisión de literatura

2.2.1.1 Aguas residuales domésticas.

El Decreto Supremo N° 001-2010-AG (2010), que aprueba el Reglamento de la Ley de Recursos Hídricos, en su artículo 131, establece que las aguas residuales son “aquellas cuyas características originales han sido modificadas por actividades antropogénicas, tengan que ser vertidas a un cuerpo natural de agua o reusadas y que por sus características de calidad requieren de un tratamiento previo”.

En este sentido, en su artículo 132, el Decreto Supremo N° 001-2010-AG (2010) indica que las aguas residuales domésticas son “aquellas de origen residencial, comercial e institucional que contienen desechos fisiológicos y otros provenientes de la actividad humana”. Éstas, a su vez, pueden incluir la mezcla con aguas de drenaje pluvial o aguas residuales de origen industrial (siempre que cumplan con los requisitos para ser admitidas en los sistemas de alcantarillado de tipo combinado), denominándose en este caso “aguas residuales municipales” (Decreto Supremo N° 001-2010-AG, 2010).

En este texto se considerarán sinónimas las palabras “municipal” (o urbana) y “doméstica”.

a. Caracterización de aguas residuales domésticas.

Conocer la naturaleza del agua residual es fundamental para la elaboración de proyectos y construcción de estructuras para su recogida, tratamiento y evacuación, así como para la gestión de la calidad ambiental (Metcalf & Eddy, 1995).

Para seleccionar los parámetros que nos permitirán caracterizar las aguas residuales, el criterio más importante es su origen (Delgadillo, Camacho, Pérez y Andrade, 2010). Las aguas residuales urbanas más típicas “tienen componentes

fácilmente separables o biodegradables, como sólidos, materia orgánica, aceites y grasas, y no suelen presentar sustancias peligrosas” (De Miguel, 2004, p. 19). Otro de los criterios fundamentales para la selección de los parámetros a analizar será el destino final de las aguas tratadas (Delgadillo *et al.*, 2010).

En la tabla 2 se indican algunos de los principales parámetros de interés a medir en aguas residuales, de acuerdo a la normatividad nacional e internacional.

Tabla 2

Principales parámetros de interés en la caracterización de aguas residuales

Parámetros físicos	
Temperatura (°C)	<p>Constituye un parámetro importante en el tratamiento de aguas residuales, debido a que muchos procesos biológicos dependen de ella (Delgadillo <i>et al.</i>, 2010). Crites y Tchobanoglous (2000), citados por Delgadillo <i>et al.</i> (2010), refieren que la temperatura determina el desarrollo de la actividad bacteriana:</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ 25-35 °C: Temperatura óptima para el desarrollo bacteriano. ➤ Alrededor de 50 °C: Se detiene la digestión aerobia y nitrificación bacteriana. ➤ Menor a 5 °C: Se inhibe la actividad microbiana.
Sólidos totales en suspensión (mg/L)	<p>Los sólidos en suspensión “pueden dar lugar al desarrollo de depósitos de fango y de condiciones anaerobias cuando se vierte agua residual sin tratar al entorno acuático” (Metcalf & Eddy, 1995, p. 56); y en el agua residual bruta presentan concentraciones de 120 (débil), 210 (media) y 400 mg/L (fuerte) (Metcalf & Eddy, 2003, citado por Déniz, 2010).</p> <p>Están constituidos por todos aquellos sólidos que quedarían retenidos en un filtro de membrana con un tamaño de poro de 1,2 µm (Delgadillo <i>et al.</i>, 2010), y representan el 20 % de sólidos totales en un agua residual urbana media, pudiendo clasificarse, a su vez, en (De Miguel, 2004):</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Sedimentables (13 %): Capaces de separarse del agua por sedimentación. ➤ No sedimentables (7 %): Coloides. <p>El 80% restante lo integran los sólidos disueltos [o filtrables] (De Miguel, 2004).</p>

Parámetros químicos

pH Influye sobre todas las demás propiedades del agua (Delgadillo *et al.*, 2010).
El pH indica la concentración de iones hidrógeno en una disolución, y es utilizado como medida de la naturaleza ácida o alcalina de una solución acuosa. En las aguas residuales urbanas, “el pH se encuentra entre 6,5 y 8,5” (Delgadillo *et al.*, 2010, p. 73).

Demanda bioquímica de oxígeno a los 5 días (DBO₅) (mg/L) Es el “parámetro de contaminación orgánica más ampliamente empleado” (Metcalf & Eddy, 1995, p. 80), y de especial importancia cuando las aguas residuales se disponen en un ambiente natural (Merzthal, 2007).

La DBO₅ constituye la cantidad de oxígeno disuelto que se consume en un agua residual durante 5 días a 20° C, por efecto de la oxidación biológica (efectuado por los microorganismos del agua) de la materia orgánica biodegradable presente. En aguas residuales urbanas puede presentar concentraciones típicas de 110 (débil), 190 (media) y 350 mg/L (fuerte) (Metcalf & Eddy, 2003, citado por Déniz, 2010).

Parámetros microbiológicos

Bacterias coliformes (NMP/100 mL) Las bacterias “son utilizadas como indicadores de contaminación fecal en las aguas, siendo la más usada la *Escherichia coli*” (De Miguel, 2004, p. 20).

Los organismos coliformes son bacterias en forma cilíndrica, presentes en el tracto intestinal humano. Al día, el ser humano descarga entre 0,1 y 0,4 billones de estas bacterias, entre otros microorganismos (Ramalho, 1990).

Mendonça (2000), citado por Delgadillo *et al.* (2010), las clasifica en:

- **Coliformes totales:** Son aerobias y anaerobias facultativas no esporuladas.
- **Coliformes fecales o termotolerantes:** Representan un subgrupo de los coliformes totales y, a diferencia de éstos, son tolerantes a temperaturas elevadas (creciendo a 44,5 °C).

Según Metcalf & Eddy (2003), citado por Déniz (2010), la concentración típica de coliformes totales y coliformes termotolerantes en el agua bruta varía de 10⁷ a 10⁹ NMP/100 mL y de 10⁶ a 10⁸ NMP/100 mL, respectivamente.

b. Tratamiento de aguas residuales domésticas.

Con el objetivo de proteger al medio ambiente, así como la salud de la población, las aguas residuales domésticas precisan de un tratamiento adecuado antes de proceder a su disposición final o reúso. Para ello, se debe considerar la mejor combinación de opciones tecnológicas, la cual conlleve a lograr el mayor beneficio ambiental, con un uso mínimo de recursos y al menor costo económico (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2009).

Cabe destacar que las tecnologías convencionales no representan precisamente una mayor eficiencia en comparación con los sistemas naturales, los cuales tienen bajo costo, pueden operarse fácilmente, y casi no requieren mantenimiento; por lo que son recomendados por encima de sistemas mecánicos en aquellos casos en los que puedan ser lo suficientemente efectivos y donde exista espacio suficiente (United Nations Environment Programme [UNEP], World Health Organization [WHO], United Nations Human Settlements Programme [HABITAT] y Water Supply and Sanitation Collaborative Council [WSSCC], 2004).

La complejidad del sistema de tratamiento dependerá del destino que se disponga darle a sus efluentes. Por tanto, en función de las diversas operaciones y procesos existentes para la depuración de aguas residuales, existen diversos niveles de tratamiento (MINAM, 2009), los cuales se describen a continuación:

➤ *Pretratamiento o tratamiento preliminar*

El pretratamiento tiene por objetivo eliminar aquellas materias y cuerpos gruesos y arenosos, cuya presencia en el agua dificultaría el funcionamiento adecuado de las instalaciones y equipos de la estación depuradora y, por ende, la eficiencia en el tratamiento en general (De Miguel, 2004).

Entre las unidades de pretratamiento destacan: los canales con rejillas gruesas y finas, los desarenadores, y, eventualmente, los tamices (MINAM, 2009).

➤ *Tratamiento primario*

El tratamiento primario constituye la primera etapa de remoción de contaminantes en aguas residuales, basado habitualmente en procesos de filtración y asentamiento (UNEP *et al.*, 2004). De esta manera, a través del tratamiento primario se puede remover entre el 60 y el 70 % de sólidos suspendidos totales, e incluso un 30 % de la DBO orgánica sedimentable del agua residual (MINAM, 2009).

➤ *Tratamiento secundario*

El tratamiento biológico secundario tiene por finalidad eliminar la materia orgánica biodegradable soluble a través de la degradación biológica; ya sea mediante procesos aeróbicos (utilizando bacterias y otros organismos que emplean el oxígeno del ambiente para descomponer los productos desechados), procesos anaeróbicos (utilizando bacterias que consiguen el oxígeno de los productos de los cuales se alimentan), o combinando ambos procedimientos (UNEP *et al.*, 2004).

Las reacciones bioquímicas originadas por los microorganismos durante este proceso logran resultados eficientes, removiendo entre el 50 y el 95 % de la DBO (MINAM, 2009).

➤ *Tratamiento terciario*

El tratamiento terciario implica la remoción de contaminantes específicos como el fósforo y el nitrógeno, así como la eliminación de microorganismos patógenos (De Miguel, 2004).

2.2.1.2 *Sistemas de depuración de aguas residuales domésticas.*

a. *Depuración con lombricultura.*

La lombricultura es un proceso limpio y de aplicación sencilla, consistente en el cultivo (o desarrollo de poblaciones) de lombrices. A través de este sistema se pueden reciclar diversos residuos orgánicos biodegradables que sirven de alimento a la lombriz, obteniendo no solo una mayor producción de lombrices (que constituyen una fuente de proteína para la alimentación de animales), sino también un abono denominado “humus de lombriz” como producto (Schuldt, 2006).

Esta biotecnología puede emplear varios tipos de lombrices entre nativas, exóticas y/o composteras. El uso de una u otra dependerá de los objetivos que el proyecto persiga (Martínez, Romero, Corlay, Trinidad y Ramírez, 1999).

Sin embargo, las especies de lombrices más aptas para criar de forma intensiva en todas las latitudes, particularmente en las medias y altas, son *Eisenia foetida* y *Eisenia andrei*; las mal llamadas lombrices rojas “de California” procedentes de Eurasia (Schuldt, 2006).

➤ *La lombriz roja californiana (Eisenia foetida).*

Las propiedades de esta lombriz fueron descubiertas en la década de los 50, en el estado de California (EE.UU.), originándose la instalación de los primeros criaderos (Rodríguez, 2005, citado por Coronel, 2015).

En la actualidad, es la especie que más se cultiva en el mundo, debido a su “rusticidad, tolerancia a los factores ambientales (humedad, temperatura y pH), potencial reproductor y capacidad de apiñamiento” (Rodríguez, 2005, p. 3).

Savigny (1826), usó la grafía *fetida* en el nombre de esta especie, Duges (1837) la corrigió por *foetida*, ortografía latina más usada. Según los artículos

correspondientes del Código de Nomenclaturas Zoológicas, esta corrección no es válida; en la actualidad el nombre *Eisenia foetida* es comúnmente usado y por lo tanto aceptado por muchos autores (Lund, 1987, citado por Tineo, 1994, p. 12).

- *Clasificación taxonómica.*

Tabla 3

Clasificación taxonómica de la lombriz roja californiana

Reino	Animal
Phylum	Anélidos
Clase	Clitelados
Orden	Oligoquetos
Familia	Lombrices
Género	<i>Eisenia</i>
Especie	<i>Eisenia foetida</i>
Nombre común	Lombriz roja de California, coqueta roja

Fuente: Clavería, 2005

- *Características físicas y ciclo de vida.*

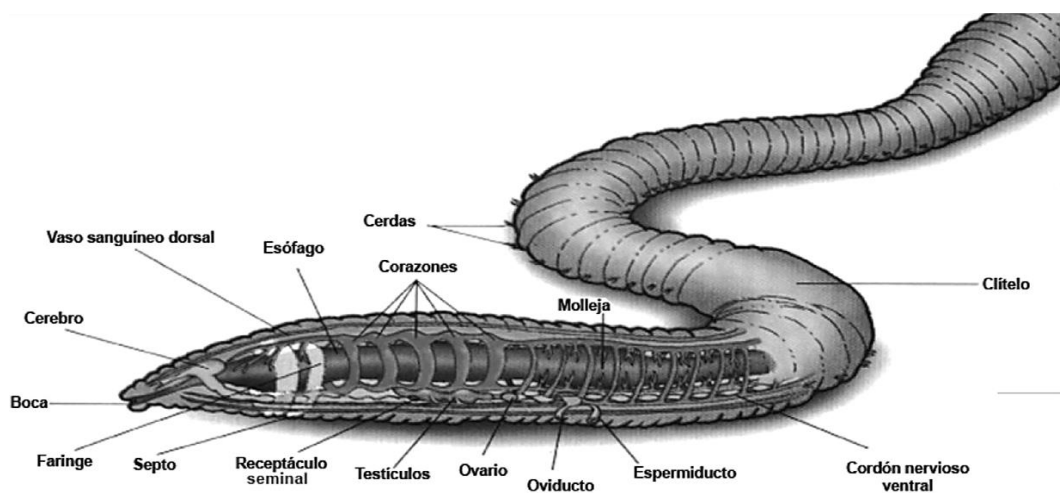


Figura 1. Morfología de la lombriz roja californiana

Fuente: Somarriba y Guzmán, 2004

Estas lombrices tienen un cuerpo largo, dividido en segmentos y con simetría bilateral, en cuyo tercio anterior poseen una porción más gruesa denominada *clitellium* (de 5 mm de extensión); asociada con la reproducción (Rodríguez, 2005).

En su estado adulto mide de 4 cm a 10 cm de largo y alcanza de 3 a 5 mm de diámetro (ver tabla 4). Su peso corporal aproximado es de 1 g, y puede consumir diariamente una cantidad de residuos orgánicos equivalente a su peso (Chamorro y Romero, 1986; García y Solano, 2005).

Tabla 4

Características morfológicas de la lombriz roja californiana

Estructura	Característica
Longitud	Entre 4 y 10 cm.
Diámetro promedio	Entre 3 y 5 mm.
N° de segmentos	Entre 108 y 210.
Clitelo	Inicia en los segmentos 24-25 y se expande hasta el 32
Color	Coloración rojiza con fajas intersegmentadas blancuzcas o amarillentas [adultez].

Fuente: Adaptado de Romero y Chamorro, 1986, citados por García y Solano, 2005

Las lombrices viven aproximadamente 16 años, alcanzando la madurez sexual a los 3 meses. Son hermafroditas pero no pueden autofecundarse, por lo que es indispensable la cópula, la cual sucede cada 7 o 10 días. Posteriormente, cada individuo coloca una cápsula (huevo amarillento en forma de pera) de alrededor de 2 mm, de la cual nacen de 2 a 21 lombrices luego de un tiempo de incubación de entre 14 a 21 días (dependiendo del cuidado y alimentación) (Rodríguez, 2005).

- *Hábitat.*

Comúnmente se encuentra al género *Eisenia* en algunos biotopos creados por el hombre, fundamentalmente en aquellos en los que se aglomeran detritus orgánicos en descomposición (Tineo, 1994). Entre ellos: montones de estiércol adecuadamente madurados o residuos orgánicos (vegetales y animales) con cierto grado de compostación (Schuldt, 2006). Igualmente, puede habitar “en tierra muy húmeda con un alto contenido de materia orgánica” (Padilla y Cuesta, 2003, p. 118).

Se la encuentra en los primeros 50 cm del suelo, por lo cual es muy sensible a las variaciones del clima. Asimismo, se caracteriza por ser fotofóbica, ya que la radiación UV pueden dañarla de forma grave, así como un exceso de humedad, la acidez del medio, y una alimentación inadecuada (Rodríguez, 2005).

- *Alimentación.*

Su alimento debe consistir en materia orgánica parcial o totalmente descompuesta mediante fermentación aeróbica, con contenido de humedad próximo al 70 %. Esto con el fin de evitar que las temperaturas elevadas producidas durante la fermentación de la materia orgánica (hasta 75 °C) puedan matar a las lombrices (Rodríguez, 2005).

La lombriz, con su faringe evaginada o bulbo musculoso, chupa o succiona la tierra mientras va cavando túneles en el suelo húmedo y blando, digiriendo las partículas de origen vegetal o animal en descomposición, y luego regresa a la superficie a expulsar el resultante por el ano (Rodríguez, 2005).

Cabe mencionar que el medio en el que se cultiva la lombriz es el *sustrato*, el cual a su vez le sirve de alimento. En este medio ha de poder encontrar lo

necesario para cubrir sus necesidades vitales y las de su prole. El sustrato puede estar constituido por una diversidad de materia orgánica que experimenta un proceso de compostación. A su vez, la materia orgánica que se utiliza debe transformarse en un medio de cultivo del alimento de la lombriz: pequeños organismos como bacterias, protozoarios, microalgas y hongos, que ingiere con el sustrato (Schuldt, 2006).

- *Principales cualidades.*

La lombriz roja es la especie más apta para su cría, no sólo porque se adecúa mejor al cautiverio sin fugarse, sino también porque posee una serie de características biológicas que la vuelven especial para su explotación (García y Solano, 2005).

Este anélido posee una buena prolificidad llegando a duplicar su población entre los 45 y 60 días, además de alimentarse de todo tipo de desechos orgánicos, sean de origen animal o vegetal (poca selectividad) (Rodríguez, 2005). Así mismo, es capaz de convivir en altas densidades (40 000 lombrices por m²) y producir deyecciones ricas en flora bacteriana (2×10^{12} bacterias/g de humus), consideradas como un excelente abono orgánico (Flores y Alvira, 1988, citados por Loza *et al.* 2010; García y Solano, 2005).

Por otro lado, Basaure (1993), citado por Hernández (2005), señala que esta especie no adquiere ni transmite enfermedades, debido a que los organismos patógenos (bacterias, hongos y protozoos) forman parte de su dieta alimenticia, destruyéndolos al digerirlos y convirtiéndolos en componentes de sus deyecciones.

- *Condiciones ambientales para su desarrollo.*

Tabla 5

Condiciones ambientales para el desarrollo de la lombriz roja californiana

Parámetro	Descripción
Humedad	Para facilitar la toma y digestión del alimento, y el desplazamiento de la lombriz en el sustrato, la humedad debe ser del 70 % (en condiciones tropicales de 70 a 80 %). De lo contrario, puede originarse la muerte del animal debido a que la escasez de humedad les impide realizar las operaciones antes mencionadas. Por otro lado, una humedad excesiva ocasiona empapamiento y oxigenación insuficiente (Rodríguez, 2005). En terrenos con humedad menor al 50 %, la lombriz puede permanecer aletargada por periodos prolongados (Schuldt, 2006).
Temperatura	El género <i>Eisenia</i> se adapta a un amplio rango de temperaturas (entre 12 y 32 °C); sin embargo, la temperatura óptima para su desarrollo fluctúa entre 15 y 25 °C. En condiciones climáticas críticas, las lombrices reducirán la ingestión de alimento y la reproducción, a medida que se alejan del óptimo (García y Solano, 2005).
pH	El pH deseable en el sustrato debe oscilar entre 6,0 y 8,0; aunque las lombrices sean capaces de penetrar en lechos más ácidos (de hasta 5,0) y más alcalinos (próximos a 9,0). La actividad de las mismas hace que los sustratos evolucionen a valores cercanos a la neutralidad (Schuldt, 2006).
Riego	Los sistemas de riego son el manual y por aspersión, evitando siempre el encharcamiento, debido a que el exceso de agua origina el desplazamiento del aire del sustrato, provocando la fermentación anaeróbica. Así mismo, un elevado porcentaje de sodio y sales en el agua de riego pueden ocasionar la reducción del valor nutritivo del lombricompuesto (Rodríguez, 2005).
Aireación	Es un factor imprescindible para la correcta respiración y el desarrollo de las lombrices. Por ello, si no es adecuada, se origina un descenso en el consumo de alimento y el apareamiento; y por tanto, en la reproducción (Rodríguez, 2005).

➤ *Sistemas de tratamiento de aguas residuales con lombricultura.*

Son sistemas biológicos de flujo vertical basados en la aplicación de lombrices (*Eisenia foetida*) para el tratamiento de aguas residuales, los cuales debido a sus características físicas o estructurales son altamente eficientes en la remoción de materia orgánica y organismos patógenos (Fernández, 2011, citado por Ramón *et al.*, 2015). Constituyen sistemas globales de las aguas residuales, pues no separan los procesos en tratamientos primarios, secundarios o terciarios, sino que las funciones y objetivos que estas tecnologías realizan en forma separada son cumplidas por un único proceso (Guzmán, 2004).

Esta tecnología, que combina el tratamiento del agua residual con la degradación de la contaminación retenida durante el proceso de depuración, gracias a la acción de una población de lombrices, consigue transformar un residuo (agua residual) en tres recursos: agua tratada, enmienda orgánica y lombrices (Bidatek, 2007).

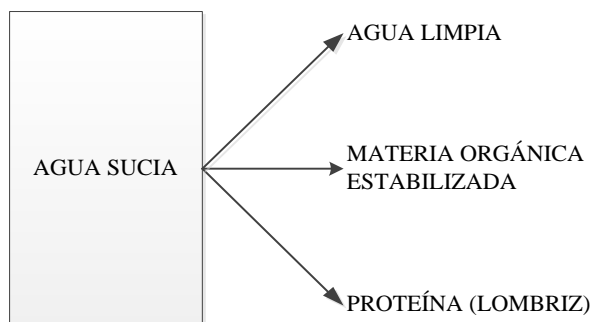


Figura 2. Subproductos de la aplicación de la lombricultura en la depuración de aguas residuales
Fuente: Bidatek, 2007

- *Estructura del sistema.*

Según InduAmbiente (2013), citado por Coronel (2015), la unidad de tratamiento biológico o lombrifiltro está conformado por diversos estratos o lechos filtrantes, los que van en orden descendente de la siguiente manera: un estrato de humus y

lombrices, un estrato de aserrín y viruta, un estrato de gravilla y finalmente un estrato de bolones. Además, posee un doble fondo, ductos de ventilación y un sistema de aspersión para la distribución del agua.

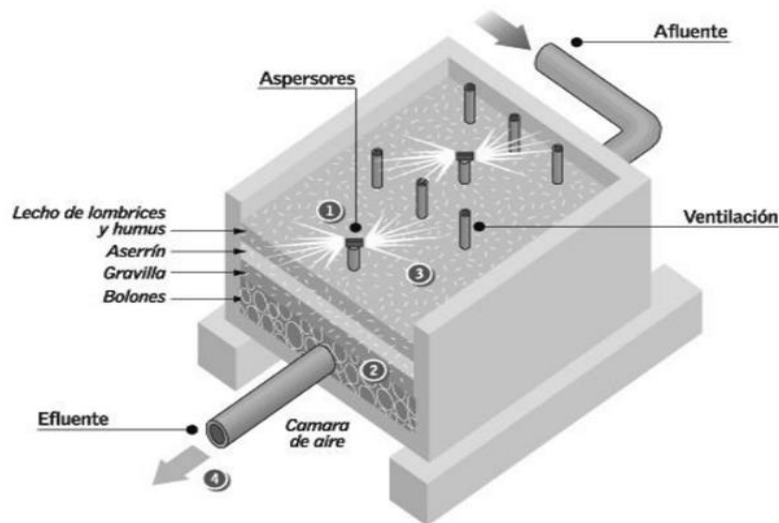


Figura 3. Corte esquemático del sistema de tratamiento con *Eisenia foetida*

Nota: 1 = Por aspersión, el afluente se reparte de forma homogénea sobre la totalidad de la superficie del biofiltro; 2 = el agua percola por los lechos filtrantes, quedando la materia orgánica retenida en sus capas; 3 = las lombrices y la flora bacteriana generada por éstas consumen las sustancias orgánicas; 4 = el agua que fluye no es fuente de contaminación.

Fuente: Fundación para la transferencia tecnológica de la Universidad de Chile, s. f., citado por Guzmán, 2004

- Parámetros de diseño.

El diseño del lombrifiltro está fundamentado en la realización de un balance de masas que incluye: el número de lombrices que puede cohabitar por unidad de área, la cantidad de materia orgánica que éstas son capaces de digerir y la tasa máxima de riego que puede soportar el lecho para evitar la muerte de lombrices por falta de oxígeno (Quinchel, 2015). En base a estudios de las experiencias de su aplicación, se ha definido la eficiencia de este sistema, el cual, según lo determinado, permite el tratamiento de 1000 L de aguas residuales por m² por día. Es decir, para tratar 1 m³ de aguas servidas, es necesario 1 m² efectivo de lombrifiltro (Guzmán, 2004).

De esta manera para el diseño del lombrifiltro se considera:

$$T_{Riego} = \frac{Q}{A} \leq 1 \text{ (m}^3\text{/día)/m}^2 \quad (1)$$

Una vez determinado el caudal de diseño, y asumiendo una tasa de riego, la superficie requerida para el tratamiento puede ser establecida (Quinchel, 2015).

➤ *Funcionamiento del sistema.*

El agua residual es regada sobre el biofiltro compuesto por estratos de diversos materiales, en cuya capa superior se encuentra el material orgánico con un elevado número de microorganismos y lombrices. Este afluente percola a través de los distintos estratos del medio filtrante, quedando retenida en las capas superiores la materia orgánica contenida en el agua residual, que luego será consumida por las lombrices y organismos asociados; eliminando de esta manera sus principales contaminantes como son la materia orgánica y organismos patógenos (Fernández, 2011, citado por Ramón *et al.*, 2015). Alrededor de un tercio de estos residuos pasan a constituir la masa corporal; y el resto, las fecas que originan el humus de lombriz (Guzmán, 2004).

Aproximadamente, transcurren 40 minutos desde que el agua es asperjada sobre el filtro hasta que sale del proceso de tratamiento. Debido a que este lapso es corto, el agua residual no llega a perder el oxígeno suficiente para descomponerse, de modo que no se generan olores (Quinchel, 2015).

El lombrifiltro es considerado un sistema ecológico, debido a que consume poca energía, no se utilizan aditivos químicos ni se generan residuos contaminantes. No obstante, es altamente eficiente en la eliminación de los parámetros contaminantes del agua (Guzmán, 2004), tal como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6*Índices de eficiencia del lombrifiltro dinámico aeróbico*

Parámetros	Eficiencia
Coliformes fecales	99 %
DBO ₅	95 %
Sólidos totales	95 %
Sólidos suspendidos volátiles	93 %
Nitrógeno total	60 a 80 %
Aceites y grasas	80 %
Fósforo total	60 a 70 %

Fuente: CBArq Arquitectura, Construcción y Diseño, 2015

Por otro lado, este sistema es sensible a las variaciones súbitas de parámetros químicos o a la descarga de sustancias tóxicas, además de necesitar horqueteo y la incorporación, cada 4 meses, de viruta de madera para no afectar su correcto funcionamiento (Quinchel, 2015).

b. Depuración con macrófitas flotantes.

El término macrófitas comprende a todas aquellas plantas que son visibles a simple vista; por tanto, aquellas de este tipo que crecen en los humedales son denominadas “macrófitas acuáticas”, las cuales pueden ser plantas vasculares (helechos y angiospermas), grandes algas y musgos (Curt, 2004a).

Las especies utilizadas en fitodepuración constituyen un grupo reducido, y en sistemas de tratamiento de agua estrictamente acuáticos se emplean plantas de flotación libre, como el jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) y las lentejas de agua (*Lemna spp.*) (Curt, 2004b).

Los sistemas con especies flotantes son estanques de profundidad variable (0,4 a 1,5 m) en los que las macrófitas (en un monocultivo o policultivo) se desarrollan de forma natural (Martelo y Lara, 2012).

Estos sistemas, conocidos también como humedales artificiales, remueven el material orgánico (DBO) y fósforo, oxidando el amonio y reduciendo nitratos; por medio de mecanismos complejos que implican filtración, oxidación bacteriana, sedimentación y precipitación química (Cooper *et al.*, 1996, citados por Delgadillo *et al.*, 2010). De esta forma, el agua residual es depurada lenta y progresivamente durante el periodo de retención (Delgadillo *et al.*, 2010).

Este sistema puede ser utilizado para dar tratamiento terciario a efluentes secundarios de sistemas convencionales, gracias a su capacidad de eliminar elementos minerales eutrofizantes; y también para dar tratamiento secundario, mediante la acción de los microorganismos fijos al sistema radicular de las macrófitas, que descomponen la materia orgánica disuelta y favorecen la reducción de los sólidos en suspensión al quedar adheridos en las raíces de las plantas (Fernández, 2004).

Una de las ventajas, y quizás la más importante, es que son “sistemas naturales totalmente respetuosos e integrado con el medio ambiente [*sic*]” (Fernández, 2004, p. 80).

➤ *El jacinto de agua (Eichhornia crassipes [Martius] Solms).*

El jacinto de agua es una planta acuática flotante no enraizada, herbácea perenne, comúnmente encontrada en ambientes acuáticos de climas tropicales, donde ha llegado a ser considerada como planta invasiva, y como una de las más dañinas a nivel mundial. Sus hojas relucientes, dispuestas en forma de roseta, con peciolos

abultados y llamativas flores azuladas-lilas lo hacen fácilmente distinguible de otras plantas flotantes (Curt, 2004b).

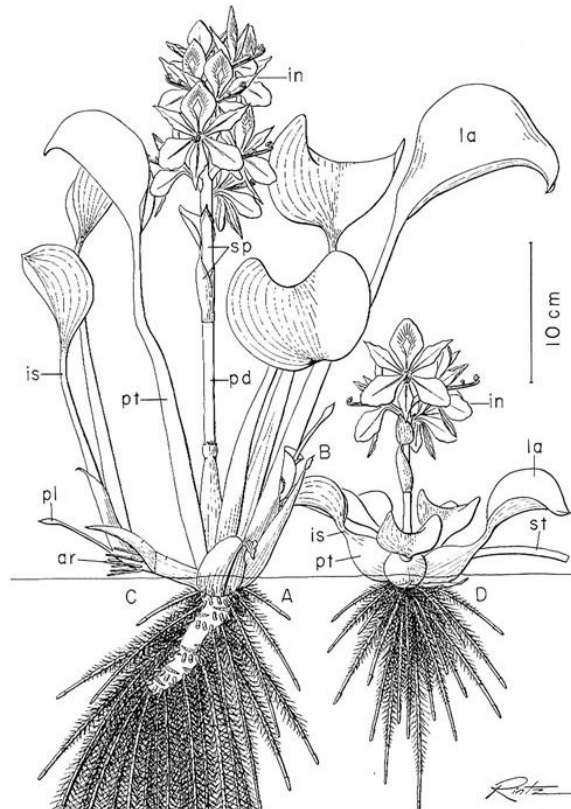


Figura 4. Morfología del jacinto de agua

Nota: A = roseta de peciolo atenuada en condiciones de confinamiento; B = yema axilar en expansión; C = rama en desarrollo; D = roseta de peciolo bulbosa en condiciones abiertas; ar = raíz adventicia; in = inflorescencia; is = itmo de la hoja; la = filo de la hoja; pl = hoja primaria; pd = espiga del pedúnculo de la flor; pt = peciolo de la hoja; sp = espata; st = estolones.

Fuente: European and Mediterranean Plant Protection Organization, s. f., citado por Castillo, 2013

El jacinto de agua habita en sistemas lóticos de cursos bajo y medio, y en sistemas lénticos de lagunas permanentes (García, Fernández y Cirujano, 2009). Prefiere aguas ricas en nutrientes, un pH de 6 a 8 unidades, y una temperatura entre 25 y 27,5 °C (aunque es capaz de crecer entre 1 y 40 °C), no obstante, se presume que presenta sensibilidad al frío (Poma y Valderrama, 2014).

Así mismo, el aumento de las cantidades de nitrógeno y agua incrementan su tasa de crecimiento (Poma y Valderrama, 2014); por tanto, éste no se ve

limitado en cuerpos de agua eutrofizados con altos niveles de nitrógeno, y tampoco en presencia de fósforo o potasio, o en aguas contaminadas con metales pesados como plomo y cobre (Robles y Madsen, 2015).

Por otra parte, sus necesidades de cosecha “están en función de los objetivos de calidad del agua, de la tasa de crecimiento de las plantas, o de la acción de predadores” (Environmental Protection Agency [EPA], 1988, citado por Martelo y Lara, 2012).

➤ *Sistemas de tratamiento de aguas residuales con jacinto de agua.*

Una cantidad significativa de macrófitas flotantes ha sido utilizada en sistemas de tratamiento y ejercicios de investigación a escala real y de laboratorio, siendo la de mayor interés el jacinto de agua. De acuerdo a la literatura, esta especie alcanza reducciones de hasta 95 y 90,2 % de la DBO₅ y DQO, respectivamente. Asimismo, se han registrado disminuciones en un rango entre 21 y 91 % de sólidos suspendidos (Martelo y Lara, 2012).

c. Depuración mediante cloración.

Como método de desinfección, la cloración se trata de la destrucción selectiva de los organismos causantes de enfermedades (MINAM, 2009). La desinfección del agua se ocupa de la desactivación completa y/o destrucción de los microorganismos dañinos existentes en ella, y puede realizarse utilizando medios físicos o químicos (González, 2007).

En el tratamiento de aguas residuales, la desinfección cumple un papel relevante cuando la disposición final del agua está orientada al riego agrícola, riego de parques recreativos y otros usos donde la calidad y seguridad del efluente

son un requisito indispensable para la salud humana. El cloro, en sus distintas formas, es una de las tecnologías más aplicadas en procesos de tratamiento de agua residual como desinfectante, así como para la remoción de color y olor (Comett, Orta, y Monje, s. f.).

Aunque la cloración es una práctica muy usual, debe señalarse que la materia orgánica remanente en el agua residual tratada, oxida el cloro aminorando su acción desinfectante y facilitando la formación de compuestos químicos organoclorados capaces de causar problemas a la salud, por sus efectos cancerígenos, y de poner en peligro a la vida acuática, pudiendo permanecer durante períodos prolongados en el medio ambiente (MINAM, 2009). Por lo tanto, su acción es mejor cuando se parte de agua intermedia de buena calidad, es decir, baja en materia orgánica y sólidos suspendidos (Hernández, 2014).

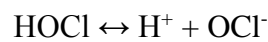
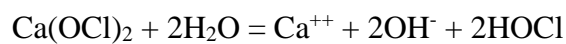
➤ *El hipoclorito de calcio: $Ca(ClO)_2$.*

El cloro como desinfectante puede ser aplicado en forma de gas comprimido bajo presión o en soluciones de agua, soluciones de hipoclorito de calcio o de hipoclorito de sodio. Dichas formas son equivalentes químicamente gracias al rápido equilibrio que existe entre el gas molecular disuelto y los productos disociados de compuestos de hipoclorito (Hammeken y Romero, 2005).

El hipoclorito de calcio es un material granular seco, blanco o blanco-amarillento producido a partir de la reacción de la cal y el cloro (American Water Works Association [AWWA], 1991). Su contenido disponible de cloro es de 60 a 70 %, y se presenta en forma granular o de tabletas. Es un buen desinfectante, bactericida, alguicida, funguicida y blanqueador, que en condiciones normales de almacenamiento se conserva durante más de un año; mas es inestable cuando se

expone a la luz y a fuentes térmicas (mayor de 50° C). Su composición química se altera cuando es almacenado en lugares húmedos debido a su capacidad higroscópica (González, 2007).

“Cuando se añade al agua, bien como gas o bien como solución, el cloro reacciona para formar ácido hipocloroso (HOCl), que subsiguientemente se disocia” (Ramalho, 1990, p. 637). En el caso del hipoclorito de calcio, se pueden observar las siguientes reacciones químicas:



➤ *Factores que influyen en la acción del desinfectante.*

Los siguientes factores influyen en la desinfección del agua (Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente [CEPIS], 1988):

- El número y naturaleza de los organismos a ser eliminados.
- La concentración y tipo del desinfectante empleado.
- La temperatura del agua a desinfectar: a mayor temperatura, más rápida será la desinfección.
- El tiempo de contacto: a mayor tiempo de contacto del desinfectante con el agua, más completo se vuelve el efecto de desinfección. Al respecto, Metcalf & Eddy (1995) indica que “el tiempo de contacto suele venir especificado por los organismos de control, y puede variar entre 15 y 45 minutos” (p. 571).
- La naturaleza del agua a ser desinfectada; si el agua contiene materia particulada, en especial de tipo coloidal y orgánica, el proceso de desinfección será usualmente obstaculizado. Por tanto, si existen compuestos orgánicos que interfieren en el proceso, se necesitarán dosis adicionales de cloro y mayores

tiempos de contacto para lograr una reducción elevada del contenido bacteriano (Metcalf & Eddy, 1995).

Las dosis típicas de cloro requeridas para desinfección según el tipo de efluente se presentan en la tabla 7:

Tabla 7

Dosis típicas de cloro en desinfección

Efluente de	Intervalo de dosificación (mg/L)
Aguas residuales sin tratar (precloración)	6-25
Sedimentación primaria	5-20
Planta de precipitación química	2-6
Filtro percolador	3-15
Lodo activado	2-8
Filtro múltiple seguido de planta de lodos activados	1-5

Fuente: Ramalho, 1990

- El pH del agua. Los mejores resultados en la cloración ocurren cuando el suministro de agua tiene un pH de 7,5 o menos (AWWA, 1991). Esto ocurre porque a menor pH, la proporción de ácido hipocloroso (HOCl) respecto al ión hipoclorito (OCl⁻) es mayor, siendo la capacidad de destrucción de organismos del HOCl de 40 a 80 veces superior a la del OCl⁻ (Metcalf & Eddy, 1995).
- Mezcla: una buena mezcla asegura la dispersión adecuada del desinfectante a través del agua, promoviendo así el proceso de desinfección.

Otros factores que influyen en el proceso de desinfección con cloro son:

- La demanda de cloro. Como se observa en la figura 5, al agregarse cloro al agua, éste reaccionará primero y de forma casi instantánea con los compuestos

inorgánicos comunes presentes en la mayoría de las fuentes de agua, como el sulfuro de hidrógeno (H_2S) y el hierro ferroso (Fe^{+2}), sin existir aún desinfección en esta etapa. A medida que se agrega más cloro, éste reaccionará con el amoníaco y la materia orgánica del agua para formar compuestos organoclorados, como las cloraminas, los cuales tienen una acción desinfectante, pero muy lenta (AWWA, 1991).

Estas reacciones iniciales forman parte de lo que se conoce como demanda de cloro del agua, y una vez que se satisface, la adición de una mayor cantidad de cloro comenzará a acumular cloro residual, el cual logrará el resto de la desinfección. El punto en el que se cumple esta demanda inicial de cloro se conoce como “breakpoint” o “punto de ruptura” (AWWA, 1991).

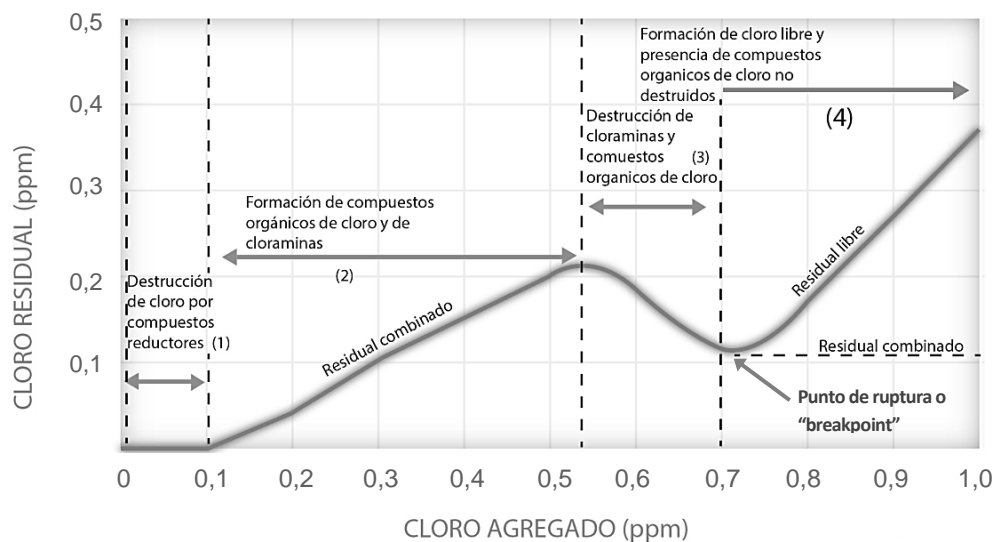


Figura 5. Curva generalizada obtenida durante la cloración al breakpoint
 Fuente: Adaptado de Metcalf & Eddy, 1995, citado por Carbotecnia, 2015

Cabe destacar que la dosis de cloro es determinada por la sumatoria de la demanda de cloro y el cloro residual que se desea mantener (AWWA, 1991).

- La eficacia germicida del cloro. Al emplearse cloro en la desinfección de aguas residuales, “los principales parámetros medibles, además de las

variables ambientales tales como el pH o la temperatura, son el número de organismos y el cloro residual remanente después de un periodo de tiempo determinado” (Metcalf & Eddy, 1995, p. 384).

La reducción del número de organismos del efluente clorado de un proceso de tratamiento primario puede definirse mediante la siguiente relación (White, 1985, citado por Metcalf & Eddy, 1995):

$$N_t/N_0 = (1 + 0,23 C_t t)^{-3} \quad (2)$$

Donde:

N_t = número de organismos coliformes en el instante t .

N_0 = número de organismos coliformes en el instante 0.

C_t = cloro residual medido amperométricamente en el instante t (mg/L).

t = tiempo de permanencia (min).

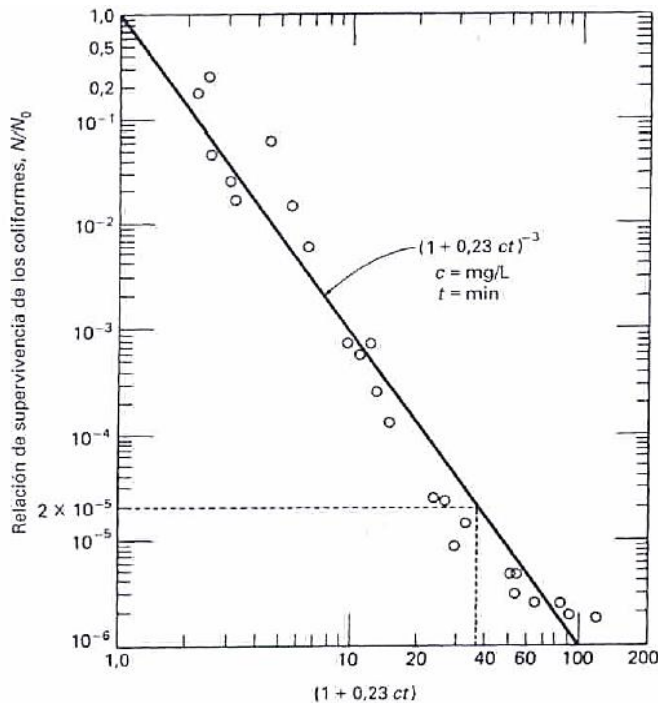


Figura 6. Supervivencia de coliformes en un reactor de alimentación discontinua (en función del cloro residual amperométrico y del tiempo de contacto)

Fuente: Metcalf & Eddy, 1995

2.2.1.3 Moquegua.

a. Ubicación política y geográfica.

Políticamente, la región Moquegua se ubica en la zona sur occidental del territorio peruano, limitando por el norte con la región Arequipa y Puno, por el este con la región Puno y Tacna, por el sur con la región Tacna y por el oeste con el Océano Pacífico y la región Arequipa (Gobierno Regional de Moquegua, 2013).

Geográficamente, la capital de la región Moquegua se sitúa entre las coordenadas 17°11'27'' de latitud sur y 70°55'54'' de longitud oeste (Instituto Nacional de Estadística e Informática [INEI], 2000).

b. Territorio.

El territorio de la región Moquegua representa el 1,2 % del territorio nacional, ocupando una superficie aproximada de 15 733,97 km²; que abarca zonas de la costa y sierra, con alturas que varían desde 0 hasta más de 6000 m.s.n.m. Es de resaltar que, la capital de la región, lugar donde se realizó la presente investigación, se sitúa a los 1410 m.s.n.m. (INEI, 2000).

c. División política.

La región Moquegua está conformada por 20 distritos que se agrupan en tres provincias: General Sánchez Cerro, Mariscal Nieto e Ilo. La capital de la región, el distrito de Moquegua, se ubica en la provincia Mariscal Nieto y concentra el 44,9 % de la población (Gobierno Regional de Moquegua, 2013).

d. Clima y temperatura.

El clima de la región Moquegua es heterogéneo, siendo templado y húmedo durante todo el año en la costa (31 % del territorio), con precipitaciones anuales mínimas; y en la sierra (69 %), templado en los valles interandinos y glacial en la puna, donde la temperatura puede descender varios grados bajo cero en las noches (Gobierno Regional de Moquegua, 2013).

El distrito de Moquegua presenta una temperatura media de 18 °C, que en verano puede llegar a alcanzar hasta los 30 °C, y una temperatura media mínima que oscila entre 8 y 9 °C, pudiendo descender hasta los 5 °C y aún menos. Así también, presenta varias horas de sol durante el día y atardeceres templados o fríos que varían según las estaciones del año (Kuon, 1980).

La región Moquegua cuenta con dos cuencas hídricas: el río Tambo y el río Moquegua. El río Moquegua, que recorre el distrito de Moquegua, tiene sus orígenes en la confluencia de los ríos Tumilaca, Torata y Otorá (o Huaracane), llegando a discurrir hasta la provincia de Ilo, donde recibe el nombre de Osmore hasta su desembocadura. Este río presenta una longitud de 139 km y es de régimen irregular y carácter torrencioso (Kosaka *et al.*, 2001).

e. Población y principales actividades económicas.

Según los Censos Nacionales 2007: XI Censo de Población y VI de Vivienda, la región Moquegua tenía una población de 161 533 habitantes (5,9 % de la población nacional); y su capital, el distrito de Moquegua, 49 419 habitantes para dicho año (INEI, 2007).

Se estima que la población del distrito de Moquegua para el año 2017 es de 57 920 habitantes; tomando como referencia la tasa de crecimiento anual promedio para la región de 1,6 % (INEI, 2008).

Según el IV Censo Nacional Económico 2008, la actividad económica que concentra la mayor cantidad de establecimiento en Moquegua es el comercio al por mayor y al por menor (58,00 %), seguido de las actividades de alojamiento y servicio de comida (10,90 %), y la industria manufacturera (6,20 %); mientras que la explotación minera y de canteras representaría el 0,1 % (INEI, 2010). Sin embargo, la minería sería la actividad económica de mayor relevancia por su mayor aporte al producto bruto interno (PBI) en la región, representando un 21,7 % de éste (Gobierno Regional Moquegua, s. f.).

f. Problemática del tratamiento de aguas residuales del distrito de Moquegua.

Según lo indicado en el Plan Regional de Saneamiento 2013-2021, en la región Moquegua la cobertura de tratamiento de aguas residuales es escasa, alcanzando apenas el 27,96 %, debido a la falta de plantas de tratamiento de aguas residuales, a que éstas se encuentran colapsadas o a que no cuentan con el diseño apropiado según lo indicado por las normas sanitarias. Por tal motivo, las aguas residuales vienen siendo vertidas directamente o con tratamientos muy deficientes en diferentes ríos, cuyas aguas son captadas para el riego de cultivos que posteriormente llegan a los mercados de abastos de la región, generando problemas a la salud y al medio ambiente. A lo que se sumaría la presencia de vectores como zancudos, moscas y otros, y los malos olores percibidos por la población circundante a estas plantas (Gobierno Regional Moquegua, s. f.).

2.2.2 Marco legal

2.2.2.1 Marco legal referido al vertimiento de aguas residuales domésticas a cuerpos de agua natural.

Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM - Decreto Supremo que aprueba límites máximos permisibles para los efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales

“Artículo 1°.- Aprobación de Límites Máximos Permisibles (LMP) para efluentes de Plantas de Tratamiento de Agua Residuales Domésticas o Municipales (PTAR)

Aprobar los Límites Máximos Permisibles para efluentes de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales, los que en Anexo forman parte integrante del presente Decreto Supremo y que son aplicables en el ámbito nacional”, los mismos que pueden ser observados en la tabla 8.

Tabla 8

Límites máximos permisibles para los efluentes de PTAR

Parámetro	Unidad	LMP de efluentes para vertidos a cuerpos de agua
Aceites y grasas	mg/L	20
Coliformes termotolerantes	NMP/100 mL	10 000
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	100
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	200
pH	unidad	6,5 - 8,5
Sólidos Totales en Suspensión	mg/L	150
Temperatura	°C	<35

Fuente: MINAM, 2010

Ley N° 29338.- Ley de recursos hídricos

“Artículo 79°.- Vertimiento de agua residual

La Autoridad Nacional autoriza el vertimiento del agua residual tratada a un cuerpo natural de agua continental o marina, previa opinión técnica favorable de las Autoridades Ambiental y de Salud sobre el cumplimiento de los Estándares de Calidad Ambiental del Agua (ECA-Agua) y Límites Máximos Permisibles (LMP). Queda prohibido el vertimiento directo o indirecto de agua residual sin dicha autorización”.

2.2.2.2 Marco legal referido a la reutilización de aguas residuales domésticas.

Reglamento de la Ley N° 29338 - Ley de recursos hídricos, aprobado por Decreto Supremo N° 001-2010-AG

Artículo 150°.- Criterios para evaluar la calidad del agua para reuso

Las solicitudes de autorización de reuso de aguas residuales tratadas serán evaluadas tomándose en cuenta los valores que establezca el sector correspondiente a la actividad a la cual se destinará el reuso del agua o, en su defecto, las guías correspondientes de la OMS.

a. Aprovechamiento en el riego de áreas verdes agrícolas.

Debido a que en nuestro país no se han establecido estándares que indiquen la calidad que deben tener las aguas residuales que pretendan ser destinadas al riego de áreas verdes agrícolas, se han tomado como referencia las Directrices sobre la calidad microbiológica de las aguas residuales empleadas en agricultura, recomendadas por la OMS.

Éstas indican que, para el riego de ciertos cultivos, sobre todo las verduras que se consumen crudas, se necesitan aguas residuales de alta calidad microbiológica, pero para otros cultivos selectos se pueden emplear otras de calidad inferior, donde el público no esté expuesto a contaminación (CEPIS, s. f.), como se observa en la tabla 9.

Tabla 9

Directrices recomendadas sobre la calidad microbiológica de las aguas residuales empleadas en agricultura^a

Categ.	Condiciones de aprovechamiento	Grupo expuesto	Nematodos intestinales^b (Nº de huevos/L)	Coliformes fecales (Nº por 100 ml^c)
A	Riego de cultivos que generalmente se consumen crudos, campos de deporte, parques públicos ^d	Trabajadores, consumidores, público	<1	<1000 ^d
B	Riego de cultivos de cereales industriales y forrajeros, praderas y árboles ^e	Trabajadores	<1	No se recomienda ninguna norma
C	Riego local de cultivos de la categoría B cuando ni los trabajadores, ni el público están expuestos	Ninguno	No aplicable	No aplicable

^aEn casos específicos se debería tener en cuenta los factores epidemiológicos, socioculturales y ambientales de cada lugar y modificar las directrices de acuerdo a ello. ^bEspecies *Áscaris* y *Trichuris* y anquilostomas. ^cDurante el período de riego. ^dConviene establecer una directriz más estricta (≤ 200) coliformes fecales por 100 ml) para prados públicos, como los de los hoteles, con los que el público puede entrar en contacto directo. ^eEn el caso de los árboles frutales, el riego debe cesar dos semanas antes de cosechar la fruta y ésta no se debe recoger del suelo. No es conveniente regar por aspersión.

Fuente: CEPIS, s.f

b. Aprovechamiento en el riego de áreas verdes recreativas.

Las áreas verdes recreativas (parques, jardines, campos de deporte y otros similares), “según el objetivo que se desea, deben ser regadas con aguas residuales tratadas y desinfectadas, o provenientes de un tratamiento terciario, de tal forma que brinde toda la seguridad del caso” (MINAM, 2009, p. 62).

Es así que, debido a que en nuestro país no se han establecido estándares que indiquen la calidad que deben tener las aguas residuales que pretendan ser destinadas al riego de áreas verdes recreativas, se han tomado nuevamente como referencia las Directrices sobre la calidad microbiológica de las aguas residuales empleadas en agricultura, recomendadas por la OMS, categoría A: campos de deporte, parques públicos (ver tabla 9).

Por tanto, la exigencia básica es que parques y jardines se rieguen con aguas residuales tratadas, las cuales deben contener menos de 1000 coliformes fecales por 100 mL. Así mismo, el agua debe estar libre de helmintos y protozoos (MINAM, 2009).

3.1 Definición de términos

- **Aguas residuales tratadas:** Aguas residuales procesadas en sistemas de tratamiento para satisfacer los requisitos de calidad señalados por la autoridad sanitaria, en relación con la clase de cuerpo receptor al que serán descargadas o a sus posibilidades de uso.
- **Afluente:** Agua u otro líquido que ingresa a un reservorio, planta o proceso de tratamiento.
- **Cámara de rejillas:** Son dispositivos formados por barras metálicas paralelas, del mismo espesor e igualmente separadas. Se destinan a la remoción de

solidos gruesos en suspensión, con la finalidad de proteger los dispositivos de transporte de aguas residuales y los equipos de tratamiento contra la obstrucción, así como por razones estéticas.

- **Cloro residual total:** Constituye la suma del cloro residual libre (combinación de hipoclorito y ácido hipocloroso, en una proporción que varía en función del pH) y el cloro residual combinado (resultado de la combinación del cloro con el amonio –cloraminas– y cuyo poder desinfectante es menor que el libre).
- **Efluente:** Agua residual que sale de una planta o un proceso de tratamiento.
- **Límite Máximo Permisible (LMP):** Medida de la concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos que caracterizan a un efluente o una emisión, que al ser excedida causa o puede causar daños a la salud, al bienestar humano y al ambiente. Su determinación corresponde al Ministerio del Ambiente. Su cumplimiento es exigible legalmente por el Ministerio del Ambiente y los organismos que conforman el Sistema Nacional de Gestión Ambiental.
- **Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales (PTAR):** Infraestructura y procesos que permiten la depuración de las aguas residuales domésticas o municipales.
- **Reúso de agua residual tratada:** Reutilización de aguas residuales, previamente tratadas, resultantes de las actividades antropogénicas.
- **Vertimiento de aguas residuales tratadas:** Descarga de aguas residuales previamente tratadas, que se efectúa en un cuerpo natural de agua continental o marítima. Se excluye a las provenientes de naves y artefactos navales.

CAPÍTULO III

MÉTODO

3.1 Tipo de la investigación

Investigación aplicada experimental, porque la investigación está interesada en la aplicación de conocimientos a la solución de un problema definido, a través del uso de experimentos y principios del método científico.

3.2 Diseño de la investigación

El diseño para la presente investigación fue el diseño experimental - experimento puro, para el cual se aplicó el método estadístico análisis de varianza (ANVA), con dos repeticiones para cada indicador de la variable dependiente; y su respectiva prueba de medias de Tukey, a un nivel de significancia del 5 %.

A continuación, se describe el diseño de la investigación de acuerdo a la figura 7:

3.2.1 Tratamiento preliminar

El agua residual que ingresó al sistema de tratamiento, al cual denominamos “afluente”, pasó por un *proceso de tratamiento preliminar*, consistente en una cámara de rejas, cuya finalidad fue retener los sólidos gruesos y arenosos.

El agua residual siguió hacia un *proceso de pre-sedimentación*, el cual permitió retener los sólidos suspendidos de menor tamaño, factibles de decantar,

como por ejemplo: material fino, arena u otro elemento inerte no retenido en la cámara de rejillas.

Previo al ingreso a este proceso, se realizó el análisis físico, químico y microbiológico del afluente, considerando los siguientes parámetros:

- Análisis físico: temperatura y sólidos totales en suspensión.
- Análisis químico: pH y DBO₅.
- Análisis microbiológico: coliformes termotolerantes.

3.2.2 Fase de tratamiento con lombrices (*Eisenia foetida*)

A la salida del proceso de pre-sedimentación, el agua residual fue sometida a un tratamiento con la especie *Eisenia foetida*, el mismo que fue evaluado en función de diferentes tasas de riego.

3.2.2.1 Características de los tratamientos propuestos.

La estructura empleada para el lombrifiltro tuvo un área total de 0,15 m² (50 cm de largo por 30 cm de ancho), superficie equivalente a una escala 1:4 del modelo presentado por Jordán (2005), citado por Coronel (2015).

Así mismo, basados en el estudio realizado por Salazar (2005), el lecho estuvo conformado por una capa en la cual habitaron en mancomunidad microorganismos y lombrices; y un soporte constituido por tres capas: la primera de aserrín y viruta, la segunda de grava, y la tercera de bolones. Adicionalmente, se adicionó una capa de arena gruesa entre la capa de aserrín y viruta, y la capa de grava, quedando el lombrifiltro propuesto conformado por cinco estratos, los cuales fueron en orden descendente, de la siguiente manera:

- 01 estrato con sustrato y lombrices de la especie *Eisenia foetida* (2 cm).
- 01 estrato de viruta con aserrín, ambos de madera blanca (25 cm de espesor).

- 01 estrato de arena gruesa (10 cm de espesor).
- 01 estrato de piedra triturada de río (\varnothing 6,4 - 9,5 mm) (15 cm de espesor).
- 01 estrato de bolones (piedra de río) (de 10 cm de espesor).

Adicionalmente, se instaló un doble fondo, ductos de ventilación (con lo cual se buscó oxigenar el agua residual para evitar la generación de malos olores), y un sistema de riego por goteo que distribuyó al lombrifiltro el agua proveniente del proceso de pre-sedimentación.

El agua filtrada por cada uno de los lechos filtrantes se recolectó en un último recipiente, el cual fue usado para la toma de muestras de laboratorio.

3.2.2.2 *Número de tratamientos.*

El agua residual pasó de forma paralela a través de dos tratamientos, en función de tasas distintas de riego: 1 ($\text{m}^3/\text{día}/\text{m}^2$) (a un caudal de 0,10 L/min) y 0,5 ($\text{m}^3/\text{día}/\text{m}^2$) (a un caudal de 0,05 L/min), basados en Guzmán (2004), que afirma que para tratar 1 m^3 de agua residual se necesita 1 m^2 efectivo de biofiltro, así como en la investigación realizada por Ramón *et al.* (2015) que mostró buenos índices de eficiencia a 0,050 L/min (equivalente para este caso a 0,5 [$\text{m}^3/\text{día}/\text{m}^2$]). Se tuvo también un grupo control que no fue sometido a tratamiento.

Tabla 10

Número de tratamientos con lombrices

Tratamientos	A ₁	A ₂	A ₀
Tasa de riego	0,5 ($\text{m}^3/\text{día}/\text{m}^2$)	1 ($\text{m}^3/\text{día}/\text{m}^2$)	Grupo control

Previa observación, durante 7 días, de la adaptación de la especie al sustrato de aserrín y viruta asperjado con agua residual, cada uno de los sistemas fue alimentado diariamente con caudal continuo por un período de 7 días.

A la salida del proceso, a los 7 días, se analizaron los efluentes (Efluente 1) previo a su ingreso al segundo sistema de tratamiento, considerando los mismos parámetros analizados en el afluente:

- Análisis físico: temperatura y sólidos totales en suspensión.
- Análisis químico: pH y DBO₅.
- Análisis microbiológico: coliformes termotolerantes.

3.2.3 Fase de tratamiento con jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*)

A la salida del proceso de tratamiento con lombrices, el agua residual fue sometida a un tratamiento con la especie *Eichhornia crassipes*, el mismo que fue evaluado en función de distintos tiempos de retención.

3.2.3.1 Características de los tratamientos propuestos.

La estructura de tratamiento, de tipo estanque, tuvo un área total de 0,36 m² (90 cm de largo por 40 cm de ancho) y 40 cm de profundidad, según el modelo presentado por García (2012), lo que originó una capacidad media de almacenamiento de 140 L.

3.2.3.2 Número de tratamientos.

El agua residual ingresó de forma paralela a dos tratamientos con ejemplares de jacinto de agua (previamente lavados con agua corriente), los cuales fueron evaluados en función de dos tiempos de retención: 7 días y 14 días. Se tuvo también un grupo control sin tratamiento, como se muestra en la tabla 11.

Tabla 11

Número de tratamientos con jacinto de agua

Tratamientos	B ₁	B ₂	B ₀
Tiempo de retención	7 días	14 días	Grupo control

Cada uno de los sistemas fue alimentado por única vez al inicio del ensayo, permaneciendo el agua residual en tratamiento por un período de 14 días.

Cada 7 días, se analizaron los efluentes (Efluente 2) a la salida de este proceso, previo a su ingreso a la tercera fase de tratamiento, considerando los siguientes parámetros:

- Análisis físico: temperatura y sólidos totales en suspensión.
- Análisis químico: pH y DBO₅.
- Análisis microbiológico: coliformes termotolerantes.

Cabe destacar que no existió cosecha de plantas hasta el final del experimento.

3.2.4 Fase de tratamiento con hipoclorito de calcio: Ca(ClO)₂

A la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua, el agua residual fue sometida a un tratamiento con cloración utilizando hipoclorito de calcio: Ca(ClO)₂.

3.2.4.1 Características del tratamiento.

El tratamiento del agua residual con hipoclorito de calcio se llevó a cabo en vasos de precipitados con un volumen de trabajo de 1 L. Después de adicionar el desinfectante se aplicó un mezclado rápido y se dejó reposar durante el periodo de reacción, establecido en 30 minutos, periodo promedio dentro del rango de tiempo de contacto indicado por Metcalf & Eddy (1995).

3.2.4.2 *Número de tratamientos.*

El agua fue sometida a un tratamiento con una dosis de cloro (como cloro activo) de 3,68 mg/L, obtenida mediante de la suma de la demanda de cloro (0,7 mg/L, según la figura 5) y el cloro residual, calculado según la Ecuación 2: $N_t/N_0 = (1 + 0,23 C_t t)^{-3}$, donde:

- N_t = Número de organismos coliformes en el instante t.

Considerándose el valor final deseado de 10^0 coliformes fecales/100 mL de agua residual, considerado como indicativo de que todos los patógenos han muerto. Esto con el fin de dar un margen de seguridad a los límites establecidos de <1000 coliformes fecales/100 ml, de acuerdo a lo indicado en la tabla 9.

- N_0 = Número de organismos coliformes en el instante 0.

Considerándose un valor de 10^4 coliformes fecales/100 mL de agua residual, obtenidos en base a la concentración inicial de 10^7 NMP/100 mL en el afluente, menos una reducción promedio de 3 escalas logarítmicas de coliformes fecales obtenida en el efluente proveniente de la primera fase de tratamiento con lombrices.

- C_t = Cloro residual en el instante t (mg/L)
- t = Tiempo de permanencia: 30 min

Se tendrá también un grupo control que no será sometido a tratamiento, tal como se muestra en la tabla 12.

Tabla 12

Número de tratamientos con hipoclorito de calcio

Tratamientos	C_1	C_0
Cloración	Con $\text{Ca}(\text{ClO})_2$	Grupo control

Finalmente, a la salida de este tercer sistema, se realizó nuevamente el análisis del efluente (Efluente 3) considerando los siguientes parámetros:

- Análisis físico: temperatura y sólidos totales en suspensión.
- Análisis químico: pH y DBO₅.
- Análisis microbiológico: coliformes termotolerantes.

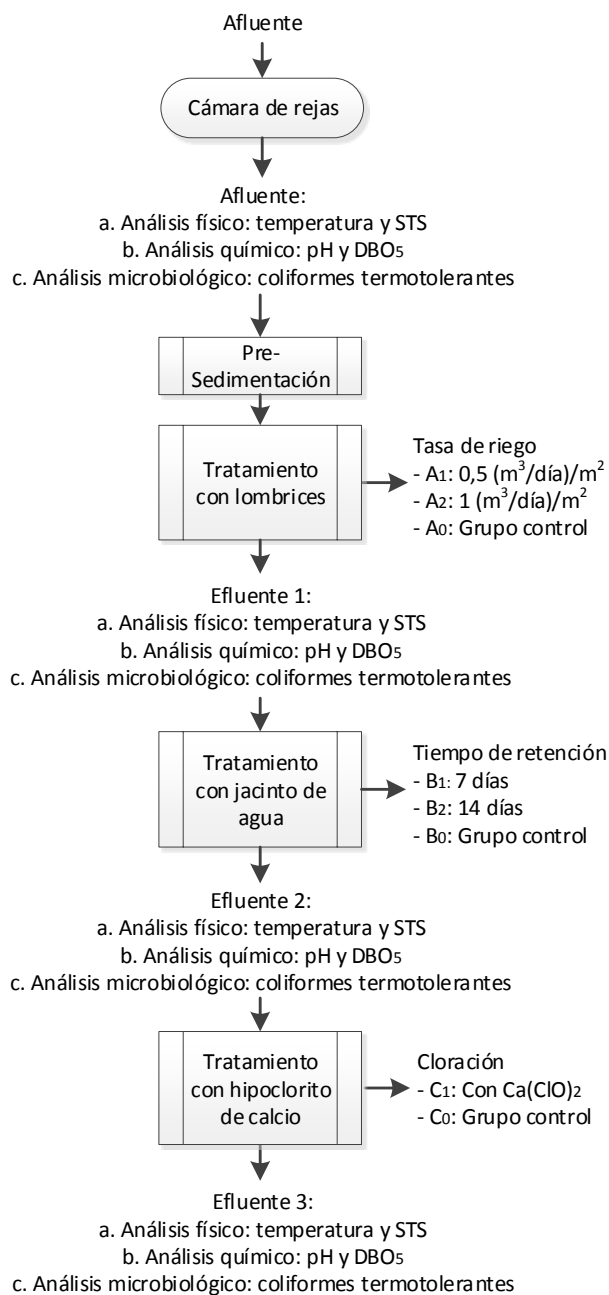


Figura 7. Diseño de la investigación

3.3 Población y muestra

3.3.1 Población

Aguas residuales domésticas generadas en el distrito de Moquegua, provincia Mariscal Nieto, región Moquegua.

3.3.2 Muestra

Aguas residuales domésticas generadas en las Lagunas de Estabilización de San Antonio, extraídas en horas de máxima y mínima producción y posteriormente homogenizadas.

La ejecución de la investigación fue desarrollada en un vivero de dimensiones 2,5 m de largo por 2,0 m de ancho, ubicado en el CPM de San Francisco, distrito Moquegua, provincia Mariscal Nieto, región Moquegua.

3.4 Descripción de instrumentos para recolección de datos

3.4.1 Técnica para la recolección de datos

Monitoreo de aguas residuales (afluente y efluentes a la salida de cada uno de los sistemas propuestos).

3.4.2 Instrumentos para la recolección de datos

- Ficha de registro de datos de campo (ver apéndice).
- Ficha de registro de resultados del monitoreo (ver apéndice).

3.4.2.1 Materiales.

Materiales de escritorio

- Papel bond A4 color blanco.
- Lapiceros tinta seca.

- Lápiz corrector.
- Lápices y borrador.

Materiales para el trabajo en campo

- 12 m de malla mosquitera.
- 2,5 m de malla Raschell.
- 04 palos de eucalipto.
- Clavos.
- Cinta métrica.
- Recipientes y tachos de plástico.
- Cuaderno de campo.

Materiales para la toma, transporte y análisis de muestras en laboratorio

- Frascos para toma de muestra.
- Cooler.
- Etiquetas.
- Cinta adhesiva.
- Plumón indeleble.
- Geles refrigerantes.
- Pissetas.
- Vasos de precipitados de 1 L y 250 ml.

Equipos de protección personal

- 01 caja de guantes de látex.
- Guardapolvos.
- Mascarillas de 3 pliegues con elástico.
- Lentes de protección.
- Tocas tipo tira.

a. *Fase de tratamiento con lombrices.*

Estructuras de tratamiento

- 01 tanque de 200 L.
- 02 estructuras metálicas de 50 x 30 x 70 cm.
- 02 planchas de vidrio de 50 x 70 cm y 6 mm de espesor.
- Tubos de PVC de ½”.
- 01 llave de paso de ¾”.
- 01 niple de Ø ¾”.
- 01 adaptador de Ø 1”.
- 01 cruzeta hidro de Ø ¾”.
- 01 tee hidro de Ø ¾”.
- 04 llaves de Ø 16 mm.
- 03 adaptador de ¾” escamado.
- 04 adaptador de ¾” x 16 mm.
- 03 m de manguera de Ø 16 mm.
- 12 goteros regulables 0.100.
- Manguera de ½”.
- 02 bandejas de acero inoxidable
- 02 recipientes de plástico de 8 L.
- Silicona.

Estratos de tratamiento

- Sustrato y lombrices de la especie *Eisenia foétida*.
- Viruta y aserrín de madera de zapote.
- Arena gruesa.
- Piedra triturada (de Ø 6,4 - 9,5 mm, aproximadamente).

➤ Piedra de río (de Ø 5 cm, aproximadamente).

➤ Malla mosquitera.

b. Fase de tratamiento con jacinto de agua.

➤ 02 estructuras de vidrio de 90 x 40 x 40 cm.

➤ 10 ejemplares de la especie *Eichhornia crassipes*.

c. Fase de tratamiento con hipoclorito de calcio.

➤ Hipoclorito de calcio al 70 %, granulado.

➤ Vasos de precipitados de 1 L.

3.4.2.2 Equipos.

➤ Equipo de cómputo.

➤ Cámara digital.

➤ Multiparamétrico.

➤ Potenciómetro.

➤ Termómetro.

➤ Balanza analítica.

➤ Agitador magnético.

Cabe indicar que para el análisis de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos en laboratorio, no se hará el uso directo de ningún equipo, ya que los análisis serán realizados por servicios en laboratorios externos.

3.4.2.3 Reactivos.

➤ Agua residual doméstica.

➤ Agua destilada.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1 Presentación de resultados

4.1.1 Características físicas, químicas y microbiológicas del afluente

Los resultados del análisis de los principales parámetros físicos, químicos y microbiológicos del afluente, se presentan en la tabla 13.

Tabla 13

Resultados de la caracterización física, química y microbiológica del afluente

Parámetro	Unidad	Valor obtenido
Parámetros físicos		
Temperatura	°C	25,50
Sólidos totales en suspensión (STS)	mg/L	99,00
Parámetros químicos		
pH	unidad	7,38
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅)	mg/L	188,13
Parámetros microbiológicos		
Coliformes termotolerantes	NMP/100 mL	2,40 x 10 ⁷

Fuente: Laboratorio de investigación y servicios [LABINVSERV], 2018; Laboratorio de salud ambiental de la Subgerencia de Salud Ambiental Moquegua, 2018

De acuerdo a los resultados obtenidos, el afluente presentó una temperatura de 25,50 °C y un contenido de STS de 99,00 mg/L.

Respecto a los parámetros químicos, el afluente mostró un pH de 7,38, considerado como neutro, así como una DBO₅ de 188,13 mg/L.

Finalmente, con respecto al parámetro microbiológico coliformes termotolerantes, el resultado fue de $2,40 \times 10^7$ NMP/100 mL.

4.1.2 Aplicación de los sistemas propuestos

Para una mejor comprensión de estos resultados, se presentan en la Tabla 14 los códigos referidos a cada uno de los sistemas, fases y tratamientos empleados.

Tabla 14

Código y descripción de los sistemas y tratamientos propuestos

Sistema A: Sistema de tratamiento con lombrices		
Fase	Tratamiento	Descripción
A: Fase de tratamiento con lombrices	A ₁	Tratamiento con lombrices a una tasa de riego de 0,5 (m ³ /día)/m ² .
	A ₂	Tratamiento con lombrices a una tasa de riego de 1 (m ³ /día)/m ² .
	A ₀	Grupo control.
Sistema AB: Sistema de tratamiento con lombrices + jacinto de agua		
Fase	Tratamiento	Descripción
B: Fase de tratamiento con jacinto de agua	A ₁ B ₁	Tratamiento con lombrices a una tasa de riego de 0,5 (m ³ /día)/m ² + 7 días de tratamiento con jacinto de agua.
	A ₂ B ₁	Tratamiento con lombrices a una tasa de riego de 1 (m ³ /día)/m ² + 7 días de tratamiento con jacinto de agua.
	A ₀ B ₀	Grupo control.
	A ₁ B ₂	Tratamiento con lombrices a una tasa de riego de 0,5 (m ³ /día)/m ² + 14 días de tratamiento con jacinto de agua.
	A ₂ B ₂	Tratamiento con lombrices a una tasa de riego de 1 (m ³ /día)/m ² + 14 días de tratamiento con jacinto de agua.
	A ₀ B ₀	Grupo control.

Sistema ABC: Sistema de tratamiento con lombrices + jacinto de agua + hipoclorito de calcio		
Fase	Tratamiento	Descripción
C: Fase de tratamiento con hipoclorito de calcio	A ₁ B ₂ C ₁	Tratamiento con lombrices a una tasa de riego de 0,5 (m ³ /día)/m ² + 14 días de tratamiento con jacinto de agua + cloración con hipoclorito de calcio.
	A ₂ B ₂ C ₁	Tratamiento con lombrices a una tasa de riego de 1 (m ³ /día)/m ² + 14 días de tratamiento con jacinto de agua + cloración con hipoclorito de calcio.
	A ₀ B ₀ C ₀	Grupo control.

4.1.2.1 Sistema de tratamiento A: Sistema de tratamiento con lombrices (*Eisenia foetida*).

a. Resultados a la salida de la fase de tratamiento con lombrices.

Tabla 15

Resultados a la salida de la fase de tratamiento con lombrices

Parámetro	Unidad	Efluente 1		Efluente 1		Efluente 1	
		A ₁ : 0,5		A ₂ : 1		A ₀ : Grupo control	
		(m ³ /día)/m ²		(m ³ /día)/m ²		control	
		r ₁	r ₂	r ₁	r ₂	r ₁	r ₂
Parámetros físicos							
Temperatura	°C	25,20	25,30	23,90	24,30	25,50	25,50
Sólidos totales en suspensión	mg/L	34,00	32,00	46,00	42,00	99,00	99,00
Parámetros químicos							
pH	unidad	8,35	8,27	8,21	8,25	7,38	7,38
DBO ₅	mg/L	95,77	90,98	96,64	91,81	188,13	188,13
Parámetros microbiológicos							
Coliformes termotolerantes	NMP/100 mL	1,1x10 ⁵	1,0x10 ⁵	3,5x10 ⁴	3,3x10 ⁴	2,4x10 ⁷	2,4x10 ⁷

Nota: r₁ = primera repetición; r₂ = segunda repetición.

Fuente: LABINVSERV, 2018; Laboratorio de salud ambiental de la Subgerencia de Salud Ambiental Moquegua, 2018

En la tabla 15 se muestran los resultados obtenidos luego del análisis fisicoquímico y microbiológico del efluente a la salida de la fase de tratamiento con lombrices, en función de distintas tasas de riego (A_1 y A_2).

Los efluentes de los tratamientos propuestos presentaron temperaturas inferiores a la del grupo control, apreciándose diferencias entre A_1 : $0,5 \text{ (m}^3\text{/día)/m}^2$ (con valores de $25,20$ y $25,30 \text{ }^\circ\text{C}$) y A_2 : $1 \text{ (m}^3\text{/día)/m}^2$, el cual fue el tratamiento que arrojó los valores más bajos de este parámetro (alcanzando los $23,90$ y $24,30 \text{ }^\circ\text{C}$). Sin embargo, todos los valores se encuentran dentro de los indicados por el Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM, para temperatura ($<35 \text{ }^\circ\text{C}$).

Los sólidos totales en suspensión a la salida de los tratamientos propuestos presentaron valores inferiores al del grupo control, y alcanzaron entre $32,00$ y $46,00 \text{ mg/L}$; siendo A_1 : $0,5 \text{ (m}^3\text{/día)/m}^2$ el tratamiento en el que se obtuvieron las concentraciones más bajas de este parámetro, con $34,00$ y $32,00 \text{ mg/L}$. En ambos casos, los valores obtenidos se encuentran dentro del límite de 150 mg/L , indicado por el Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM.

En relación al grupo control, el pH experimentó valores superiores a la salida de los tratamientos propuestos, aproximándose a la basicidad; no obstante, en ninguno de los casos se llegó a sobrepasar el límite de $8,5$, establecido en el Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM. Entre tratamientos no se apreció una diferencia marcada entre A_1 y A_2 ; sin embargo, un pH ligeramente menor pudo observarse en A_2 : $1 \text{ (m}^3\text{/día)/m}^2$, alcanzando $8,21$ y $8,25$ unidades.

La DBO_5 de los efluentes de A_1 y A_2 alcanzó valores entre $90,98$ y $96,64 \text{ mg/L}$, inferiores a la del grupo control. Entre tratamientos, las concentraciones obtenidas no tuvieron una diferencia marcada entre sí,

encontrándose dentro del límite de 100 mg/L, establecido para este parámetro en el Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM. Sin embargo, en promedio, se puede apreciar una remoción ligeramente mayor por parte de A₁.

Finalmente, tanto en A₁ como en A₂, se observó una importante reducción de coliformes termotolerantes en relación al grupo control; sin embargo, los valores obtenidos aún no cumplen los límites establecidos en el Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM ni en las Directrices recomendadas por la OMS sobre la calidad microbiológica de las aguas residuales empleadas en agricultura (10 000 y 1000 NMP/100 mL, respectivamente). Entre tratamientos, se aprecia una ligera diferencia entre A₁ y A₂, observándose, en promedio, valores menores en el segundo tratamiento.

b. Análisis estadístico por parámetro de evaluación.

➤ *Temperatura.*

Tabla 16

Resultados de la temperatura a la salida de la fase de tratamiento con lombrices a los 7 días

Tratamientos	Repeticiones	
	r ₁ (°C)	r ₂ (°C)
A ₁ : 0,5 (m ³ /día)/m ²	25,20	25,30
A ₂ : 1 (m ³ /día)/m ²	23,90	24,30
A ₀ : Grupo control	25,50	25,50

En la tabla 16 se pueden apreciar los valores del parámetro temperatura, obtenidos a la salida de los tratamientos propuestos (A₁ y A₂) y el grupo control (A₀), cada uno con dos repeticiones.

Tabla 17

Comparación de medias de la temperatura a la salida de la fase de tratamiento con lombrices a los 7 días

Ttos.	N	Media	Error estándar	95 % del intervalo de confianza para la media	
				Límite inferior	Límite superior
A ₁	2	25,25	0,05	24,61	25,89
A ₂	2	24,10	0,20	21,56	26,64
A ₀	2	25,50	0,00	25,50	25,50
Total	6	24,95	0,28	24,24	25,66

En la tabla 17 puede observarse que la temperatura a la salida de la fase de tratamiento con lombrices fue de 25,25 °C para A₁, y de 24,10 °C para A₂. Por otro lado, la temperatura media para el grupo control fue de 25,50 °C.

Tabla 18

Análisis de varianza para la temperatura a la salida de la fase de tratamiento con lombrices a los 7 días

Fuentes de variación	GL	SC	CM	FC	p-value	Sig
Tratamientos	2	2,23	1,12	39,353	0,007	**
Error experimental	3	0,09	0,03			
Total	5	2,32				

Nota: GL = grados de libertad; SC = suma de cuadrados; CM = media cuadrática; FC = F calculada; Sig = significancia.

**p < 0,01 = altamente significativo.

Los resultados obtenidos del análisis de varianza (ANVA) aplicado al parámetro temperatura, permiten observar que la diferencia de medias entre los tratamientos considerados es altamente significativa. Por lo tanto, se acepta la hipótesis de que al menos uno de los efectos de los tratamientos sobre la temperatura es diferente.

Tabla 19

Prueba de comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador temperatura, a la salida de la fase de tratamiento con lombrices a los 7 días

Nº	Tratamientos	\bar{x} (°C)	Sig	Mérito
1	A ₂ : 1 (m ³ /día)/m ²	24,10	a	1º
2	A ₁ : 0,5 (m ³ /día)/m ²	25,25	b	2º
3	A ₀ : Grupo control	25,50	b	2º

Los resultados de la prueba de Tukey muestran que el tratamiento más efectivo en la reducción del parámetro temperatura para este sistema a los 7 días fue A₂: 1 (m³/día)/m², con un promedio de 24,10 °C; seguido en segundo y último lugar por A₁: 0,5 (m³/día)/m², con un promedio de 25,25 °C, y por el grupo control.

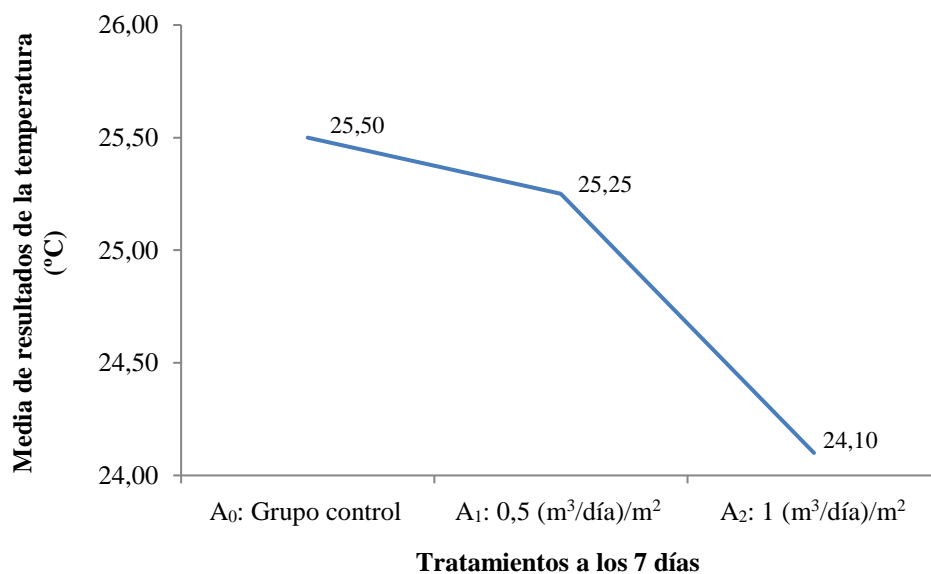


Figura 8. Comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador temperatura, a la salida de la fase de tratamiento con lombrices a los 7 días

Finalmente, según la figura 8, y reafirmando lo mostrado por la tabla 19, el tratamiento más efectivo para la reducción de la temperatura en este sistema a los 7 días es A₂: 1 (m³/día)/m², alcanzándose una media de 24,10 °C en el efluente.

➤ *Sólidos totales en suspensión (STS)*

Tabla 20

Resultados de los STS a la salida de la fase de tratamiento con lombrices a los 7 días

Tratamientos	Repeticiones	
	r ₁ (mg/L)	r ₂ (mg/L)
A ₁ : 0,5 (m ³ /día)/m ²	34,00	32,00
A ₂ : 1 (m ³ /día)/m ²	46,00	42,00
A ₀ : Grupo control	99,00	99,00

Fuente: LABINVSERV, 2018

En la tabla 20 se pueden apreciar los valores del parámetro STS, obtenidos a la salida de los tratamientos propuestos (A₁ y A₂) y el grupo control (A₀), cada uno con dos repeticiones.

Tabla 21

Comparación de medias de los STS a la salida de la fase de tratamiento con lombrices a los 7 días

Ttos.	N	Media	Error estándar	95 % del intervalo de confianza para la media	
				Límite inferior	Límite superior
A ₁	2	33,00	1,00	20,29	45,71
A ₂	2	44,00	2,00	18,59	69,41
A ₀	2	99,00	0,00	99,00	99,00
Total	6	58,67	12,92	25,44	91,89

En la tabla 21 puede observarse que el contenido promedio de STS para la fase de tratamiento con lombrices fue de 33,00 mg/L para A₁, mientras que para A₂ fue de 44,00 mg/L. Por otro lado, el contenido medio de STS del grupo control fue de 99,00 mg/L.

Tabla 22*Análisis de varianza para los STS a la salida de la fase de tratamiento con lombrices a los 7 días*

Fuentes de variación	GL	SC	CM	FC	p-value	Sig
Tratamientos	2	5001,33	2500,67	750,200	0,000	**
Error experimental	3	10,00	3,33			
Total	5	5011,33				

Nota: GL = grados de libertad; SC = suma de cuadrados; CM = media cuadrática; FC = F calculada; Sig = significancia.

**p < 0,01 = altamente significativo.

Los resultados del análisis de varianza (ANVA) para el parámetro STS muestran que la diferencia de medias entre los tratamientos considerados es altamente significativa. Por lo cual, se acepta la hipótesis de que al menos uno de los efectos de los tratamientos sobre los STS es distinto.

Tabla 23

Prueba de comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador STS, a la salida de la fase de tratamiento con lombrices a los 7 días

Nº	Tratamientos	\bar{x} (mg/L)	Sig	Mérito
1	A ₁ : 0,5 (m ³ /día)/m ²	33,00	a	1°
2	A ₂ : 1 (m ³ /día)/m ²	44,00	b	2°
3	A ₀ : Grupo control	99,00	c	3°

Los resultados de la prueba de Tukey muestran que el tratamiento más efectivo en la remoción de STS para este sistema a los 7 días fue A₁: 0,5 (m³/día)/m², con un promedio de 33,00 mg/L; seguido en segundo lugar por A₂: 1 (m³/día)/m², con un promedio de 44,00 mg/L, y en tercer y último lugar por el grupo control.

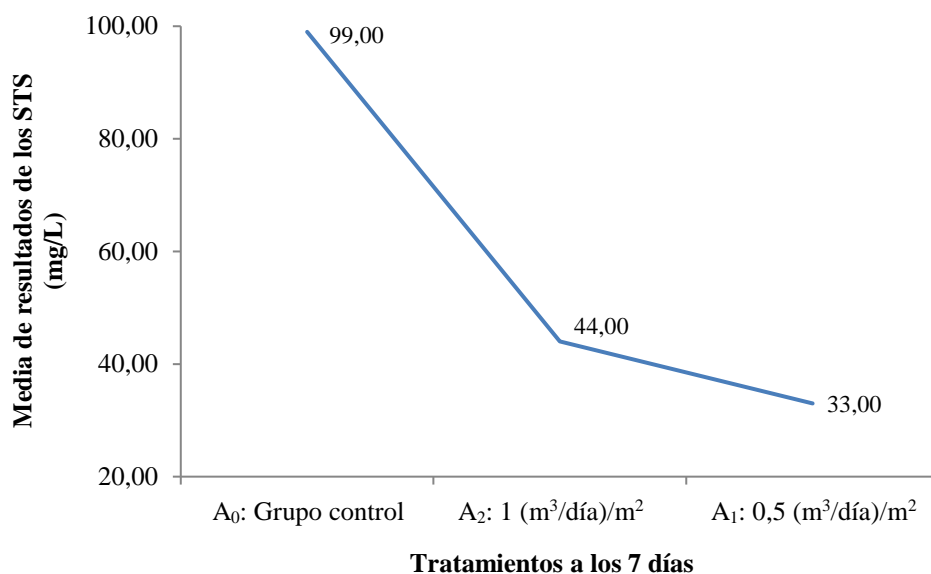


Figura 9. Comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador STS, a la salida de la fase de tratamiento con lombrices a los 7 días

Finalmente, según la figura 9 y de acuerdo a lo mostrado por la tabla 23, el tratamiento más efectivo para la remoción de STS en este sistema a los 7 días es A₁: 0,5 (m³/día)/m², logrando una concentración media de 33,00 mg/L en el efluente.

➤ *pH*

Tabla 24

Resultados del pH a la salida de la fase de tratamiento con lombrices a los 7 días

Tratamientos	Repeticiones	
	r ₁ (unidad)	r ₂ (unidad)
A ₁ : 0,5 (m ³ /día)/m ²	8,35	8,27
A ₂ : 1 (m ³ /día)/m ²	8,21	8,25
A ₀ : Grupo control	7,38	7,38

En la tabla 24 se pueden apreciar los valores del parámetro pH, obtenidos a la salida de los tratamientos propuestos (A₁ y A₂) y el grupo control (A₀), cada uno con dos repeticiones.

Tabla 25*Comparación de medias del pH a la salida de la fase de tratamiento con lombrices a los 7 días*

Ttos.	N	Media	Error estándar	95 % del intervalo de confianza para la media	
				Límite inferior	Límite superior
A ₁	2	8,31	0,04	7,80	8,82
A ₂	2	8,23	0,02	7,98	8,48
A ₀	2	7,38	0,00	7,38	7,38
Total	6	7,97	0,19	7,49	8,46

Los resultados de la tabla 25 muestran que el pH medio a la salida de la fase de tratamiento con lombrices fue de 8,31 para A₁, y de 8,23 para A₂; mientras que el pH promedio para el grupo control fue de 7,38 unidades.

Tabla 26*Análisis de varianza para el pH a la salida de la fase de tratamiento con lombrices a los 7 días*

Fuentes de variación	GL	SC	CM	FC	p-value	Sig
Tratamientos	2	1,06	0,53	398,450	0,000	**
Error experimental	3	0,00	0,00			
Total	5	1,07				

Nota: GL = grados de libertad; SC = suma de cuadrados; CM = media cuadrática; FC = F calculada; Sig = significancia.

**p < 0,01 = altamente significativo.

Los resultados obtenidos del análisis de varianza (ANVA) aplicado al parámetro pH, permiten observar que la diferencia de medias entre los tratamientos considerados es altamente significativa. Por lo que se acepta la hipótesis de que al menos uno de los efectos de los tratamientos sobre el pH es diferente.

Tabla 27

Prueba de comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador pH, a la salida de la fase de tratamiento con lombrices a los 7 días

Nº	Tratamientos	\bar{x} (unidad)	Sig	Mérito
1	A ₀ : Grupo control	7,38	a	1º
2	A ₂ : 1 (m ³ /día)/m ²	8,23	b	2º
3	A ₁ : 0,5 (m ³ /día)/m ²	8,31	b	2º

Los resultados de la prueba de Tukey muestran que el tratamiento que presentó valores de pH más cercanos a la neutralidad para este sistema a los 7 días fue el grupo control, con un promedio de 7,38 unidades, seguido en segundo y último lugar por A₂: 1 (m³/día)/m² y A₁: 0,5 (m³/día)/m², con promedios de 8,23 y 8,31 unidades, respectivamente.

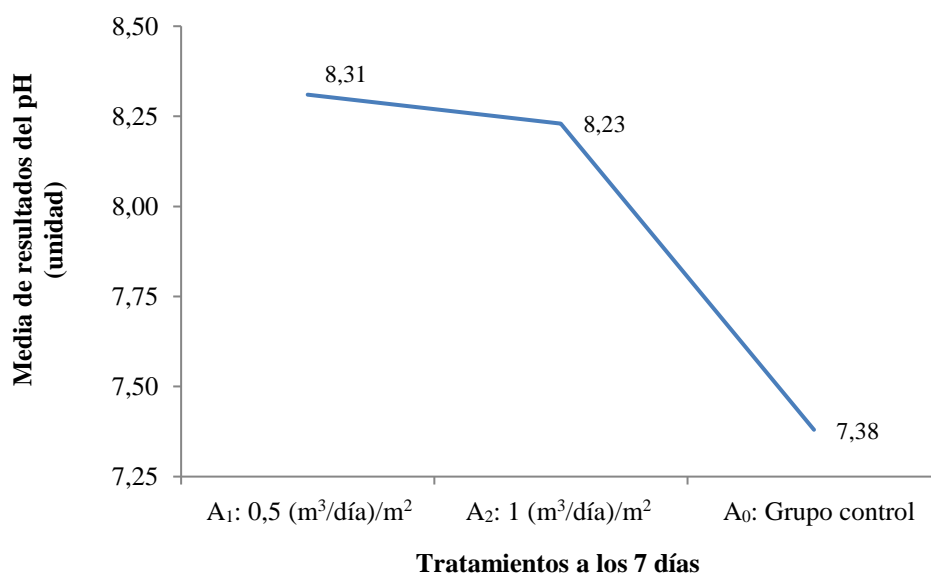


Figura 10. Comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador pH, a la salida de la fase de tratamiento con lombrices a los 7 días

Finalmente, según la figura 10, y de acuerdo a la tabla 27, el tratamiento que mantuvo valores de pH más cercanos a la neutralidad en este sistema a los 7

días es el grupo control, con una media de 7,38 unidades; mientras que por el contrario, A₁ y A₂ originaron un incremento en los valores de este parámetro.

➤ *Demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅)*

Tabla 28

Resultados de la DBO₅ a la salida de la fase de tratamiento con lombrices a los 7 días

Tratamientos	Repeticiones	
	r1 (mg/L)	r2 (mg/L)
A ₁ : 0,5 (m ³ /día)/m ²	95,77	90,98
A ₂ : 1 (m ³ /día)/m ²	96,64	91,81
A ₀ : Grupo control	188,13	188,13

Fuente: LABINVSERV, 2018

En la tabla 28 se pueden apreciar los valores del parámetro DBO₅, obtenidos a la salida de los tratamientos propuestos (A₁ y A₂) y el grupo control (A₀), cada uno con dos repeticiones.

Tabla 29

Comparación de medias de la DBO₅ a la salida de la fase de tratamiento con lombrices a los 7 días

Ttos.	N	Media	Error estándar	95 % del intervalo de confianza para la media	
				Límite inferior	Límite superior
A ₁	2	93,38	2,40	62,94	123,81
A ₂	2	94,23	2,42	63,54	124,91
A ₀	2	188,13	0,00	188,13	188,13
Total	6	125,24	19,91	74,07	176,41

La tabla 29 muestra que la DBO₅ promedio a la salida de la fase de tratamiento con lombrices fue de 93,38 mg/L para A₁, y de 94,23 mg/L para A₂; mientras que para el grupo control fue de 188,13 mg/L, en promedio.

Tabla 30

Análisis de varianza para la DBO₅ a la salida de la fase de tratamiento con lombrices a los 7 días

Fuentes de variación	GL	SC	CM	FC	p-value	Sig
Tratamientos	2	11 864,92	5932,46	769,234	0,000	**
Error experimental	3	23,14	7,71			
Total	5	11 888,06				

Nota: GL = grados de libertad; SC = suma de cuadrados; CM = media cuadrática; FC = F calculada; Sig = significancia.

**p < 0,01 = altamente significativo.

Los resultados del análisis de varianza (ANVA) aplicado al parámetro DBO₅, permiten observar que la diferencia de medias entre los tratamientos considerados es altamente significativa. De modo que se acepta la hipótesis de que al menos uno de los efectos de los tratamientos sobre la DBO₅ es diferente.

Tabla 31

Prueba de comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador DBO₅, a la salida de la fase de tratamiento con lombrices a los 7 días

Nº	Tratamientos	\bar{x} (mg/L)	Sig	Mérito
1	A ₁ : 0,5 (m ³ /día)/m ²	93,38	a	1º
2	A ₂ : 1 (m ³ /día)/m ²	94,23	a	1º
3	A ₀ : Grupo control	188,13	b	2º

Los resultados de la prueba de Tukey muestran que ambos tratamientos propuestos: A₁: 0,5 (m³/día)/m² y A₂: 1 (m³/día)/m² fueron los más efectivos en la remoción de la DBO₅ para este sistema a los 7 días, con promedios de 93,38 y 94,23 mg/L, respectivamente; seguidos en segundo y último lugar por el grupo control.

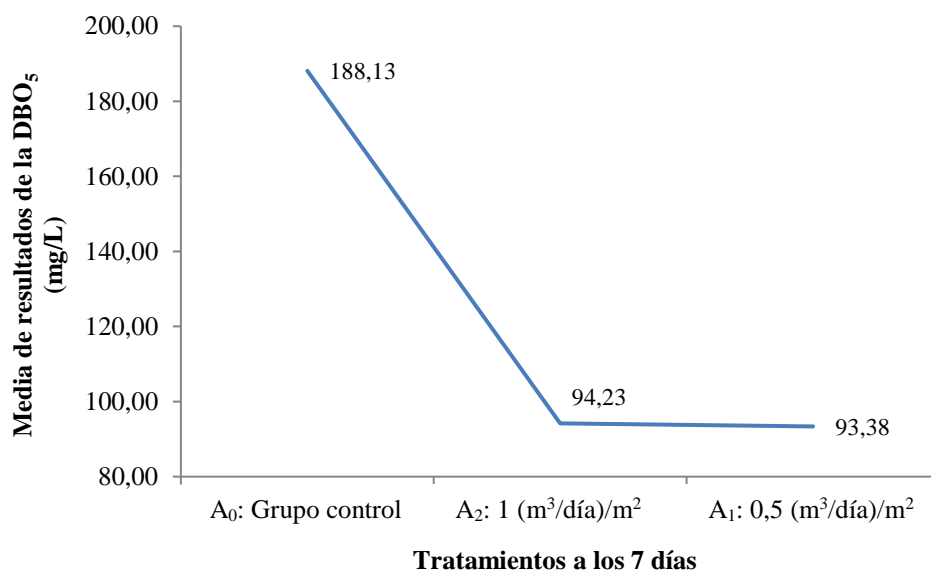


Figura 11. Comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador DBO₅, a la salida de la fase de tratamiento con lombrices a los 7 días

Finalmente, según la figura 11 y reafirmando lo mostrado por la tabla 31, tanto A₁: 0,5 (m³/día)/m² como A₂: 1 (m³/día)/m² son los tratamientos más efectivos para la remoción de la DBO₅ en este sistema a los 7 días, alcanzando sus efluentes una concentración media de 93,38 y 94,23 mg/L, respectivamente.

➤ *Coliformes termotolerantes*

Tabla 32

Resultados de las coliformes termotolerantes a la salida de la fase de tratamiento con lombrices a los 7 días

Tratamientos	Repeticiones	
	r ₁ (NMP/100 mL)	r ₂ (NMP/100 mL)
A ₁ : 0,5 (m ³ /día)/m ²	1,10 x 10 ⁵	1,00 x 10 ⁵
A ₂ : 1 (m ³ /día)/m ²	3,50 x 10 ⁴	3,30 x 10 ⁴
A ₀ : Grupo control	2,40 x 10 ⁷	2,40 x 10 ⁷

Fuente: Laboratorio de salud ambiental de la Subgerencia de Salud Ambiental Moquegua, 2018

En la tabla 32 se pueden apreciar los valores del parámetro coliformes termotolerantes, obtenidos a la salida de los tratamientos propuestos (A₁ y A₂) y el grupo control (A₀), cada uno con dos repeticiones.

Tabla 33

Comparación de medias de las coliformes termotolerantes a la salida de la fase de tratamiento con lombrices a los 7 días

Ttos.	N	Media	Error estándar	95 % del intervalo de confianza para la media	
				Límite inferior	Límite superior
A ₁	2	105 000,00	5000,00	41 468,98	168 531,02
A ₂	2	34 000,00	1000,00	21 293,80	46 706,20
A ₀	2	2,40 x10 ⁷	0,00	24 000000,00	24 000 000,00
Total	6	8 046 333,33	5 045 009,20	-4 922 275,66	21 014 942,33

Los resultados de la tabla 33 muestran que el contenido promedio de coliformes termotolerantes a la salida de la fase de tratamiento con lombrices fue de $1,05 \times 10^5$ NMP/100 mL para A₁, y de $3,40 \times 10^4$ NMP/100 mL para A₂; mientras que para el grupo control la media fue de $2,40 \times 10^7$ NMP/100 mL.

Tabla 34

Análisis de varianza para las coliformes termotolerantes a la salida de la fase de tratamiento con lombrices a los 7 días

Fuentes de variación	GL	SC	CM	FC	p-value	Sig
Tratamientos	2	$7,64 \times 10^{14}$	$3,82 \times 10^{14}$	$2,20 \times 10^7$	0,000	**
Error experimental	3	$5,20 \times 10^7$	$1,70 \times 10^7$			
Total	5	$7,64 \times 10^{14}$				

Nota: GL = grados de libertad; SC = suma de cuadrados; CM = media cuadrática; FC = F calculada; Sig = significancia.

**p < 0,01 = altamente significativo.

El análisis de varianza (ANVA) para coliformes termotolerantes, muestra que la diferencia de medias entre los tratamientos considerados es altamente significativa. De acuerdo con esto, se acepta la hipótesis de que por lo menos el efecto de uno de los tratamientos sobre las coliformes termotolerantes es diferente.

Tabla 35

Prueba de comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador coliformes termotolerantes, a la salida de la fase de tratamiento con lombrices a los 7 días

Nº	Tratamientos	\bar{x} (NMP/100 mL)	Sig	Mérito
1	A ₂ : 1 (m ³ /día)/m ²	34 000,00	a	1º
2	A ₁ : 0,5 (m ³ /día)/m ²	105 000,00	b	2º
3	A ₀ : Grupo control	24 000 000,00	c	3º

La prueba de Tukey muestra que el mejor tratamiento para la remoción de coliformes termotolerantes en este sistema a los 7 días fue A₂: 1 (m³/día)/m², con un promedio de $3,40 \times 10^4$ NMP/100 mL; seguido por A₁: 0,5 (m³/día)/m², con un promedio de $1,05 \times 10^5$ NMP/100 mL, y por el grupo control en último lugar.

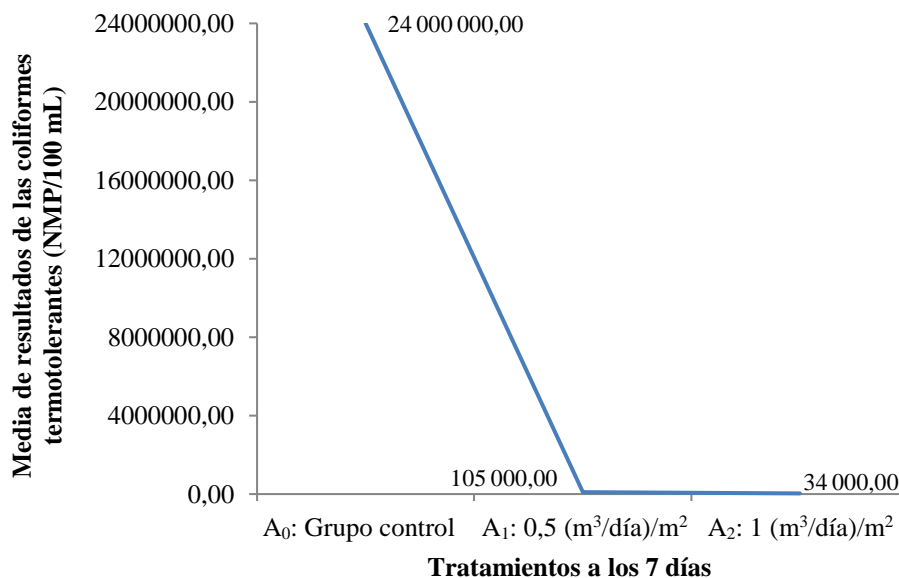


Figura 12. Comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador coliformes termotolerantes, a la salida de la fase de tratamiento con lombrices a los 7 días

Finalmente, según la figura 12, y de acuerdo a la tabla 35, se observa que el tratamiento más efectivo para la remoción de coliformes termotolerantes en este sistema a los 7 días es A₂: 1 (m³/día)/m², logrando una concentración media de 3,40 x 10⁴ NMP/100 mL en el efluente.

4.1.2.2 Sistema de tratamiento B: Sistema de tratamiento con lombrices + jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*).

a. Resultados a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 7 días.

Tabla 36

Resultados a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 7 días

Parámetro	Unidad	Efluente 2		Efluente 2		Efluente 2	
		A ₁ B ₁		A ₂ B ₁		A ₀ B ₀	
		r ₁	r ₂	r ₁	r ₂	r ₁	r ₂
Parámetros físicos							
Temperatura	°C	20,60	21,50	20,80	21,90	25,50	25,50
Sólidos totales en suspensión	mg/L	3,00	2,90	6,00	5,70	99,00	99,00
Parámetros químicos							
pH	unidad	7,68	7,75	7,48	7,38	7,38	7,38
DBO ₅	mg/L	3,90	3,70	3,10	3,30	188,13	188,13
Parámetros microbiológicos							
Coliformes termotolerantes	NMP/100 mL	1,3x10 ²	1,2x10 ²	2,2x10	2,0x10	2,4x10 ⁷	2,4x10 ⁷

Nota: A₁B₁ = tratamiento con lombrices a una tasa de riego de 0,5 (m³/día)/m² + 7 días de tratamiento con jacinto de agua; A₂B₁ = tratamiento con lombrices a una tasa de riego de 1 (m³/día)/m² + 7 días de tratamiento con jacinto de agua; A₀B₀ = grupo control; r₁ = primera repetición; r₂ = segunda repetición.

Fuente: Unidad operativa laboratorio ambiental San Agustín de Torata [UOLASAT], 2018; LABINVSERV, 2018; Laboratorio de salud ambiental de la Subgerencia de Salud Ambiental Moquegua, 2018

En la tabla 36 se muestran los resultados obtenidos luego del análisis fisicoquímico y microbiológico del efluente a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua (A_1B_1 y A_2B_1), a los 7 días.

Los efluentes de los tratamientos propuestos presentaron temperaturas inferiores a la del grupo control, apreciándose similitud entre A_1B_1 (20,60 y 21,50 °C) y A_2B_1 (20,80 y 21,90 °C). Sin embargo, todos los valores se encuentran dentro de los indicados por el Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM (<35 °C).

Los sólidos totales en suspensión a la salida de los tratamientos propuestos presentaron valores inferiores al del grupo control, y alcanzaron entre 2,90 y 6,00 mg/L; siendo, en promedio, A_1B_1 el tratamiento en el que se obtuvieron las concentraciones más bajas de este parámetro, con 3,00 y 2,90 mg/L. Así mismo, en ambos casos se puede apreciar que los valores obtenidos se encuentran dentro del límite de 150 mg/L, indicado por el Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM.

En relación al grupo control, el pH experimentó un ligero aumento a la salida de los tratamientos propuestos. Sin embargo, un pH mayor pudo observarse en el A_1B_1 , alcanzando valores de 7,68 y 7,75, sin llegar a sobrepasar el límite de 8,5, establecido en el Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM.

La DBO_5 de los tratamientos propuestos alcanzó valores entre 3,10 y 3,90 mg/L, significativamente inferiores a los del grupo control. Entre tratamientos, las concentraciones obtenidas no tuvieron una diferencia marcada entre sí, encontrándose dentro del límite de 100 mg/L, establecido para este parámetro en el Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM.

Finalmente, en los tratamientos propuestos se observó una importante reducción de coliformes termotolerantes en relación al grupo control; existiendo diferencias entre tratamientos. Sin embargo, todos los efluentes a la salida de los

tratamientos propuestos cumplieron los límites establecidos en el Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM y en las Directrices recomendadas por la OMS sobre la calidad microbiológica de las aguas residuales empleadas en agricultura (10 000 y 1000 NMP/100 mL, respectivamente).

b. *Análisis estadístico por parámetro de evaluación a los 7 días.*

➤ *Temperatura*

Tabla 37

Resultados de la temperatura a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 7 días

Tratamientos	Repeticiones	
	r1 (°C)	r2 (°C)
A ₁ B ₁ : 0,5 (m ³ /día)/m ² + 7 días de retención	20,60	21,50
A ₂ B ₁ : 1 (m ³ /día)/m ² + 7 días de retención	20,80	21,90
A ₀ B ₀ : Grupo control	25,50	25,50

En la tabla 37 se pueden observar los valores del parámetro temperatura obtenidos a la salida de los tratamientos propuestos (A₁B₁ y A₂B₁) y el grupo control (A₀B₀), cada uno con dos repeticiones.

Tabla 38

Comparación de medias de la temperatura a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 7 días

Ttos.	N	Media	Error estándar	95 % del intervalo de confianza para la media	
				Límite inferior	Límite superior
A ₁ B ₁	2	21,05	0,45	15,33	26,77
A ₂ B ₁	2	21,35	0,55	14,36	28,34
A ₀ B ₀	2	25,50	0,00	25,50	25,50
Total	6	22,63	0,927	20,25	25,02

En la tabla 38 puede observarse que la temperatura media para la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 7 días fue de 21,05 °C para A₁B₁, y de 21,35 °C para A₂B₁. Por otro lado, la temperatura media para el grupo control fue de 25,50 °C.

Tabla 39

Análisis de varianza para la temperatura a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 7 días

Fuentes de variación	GL	SC	CM	FC	p-value	Sig
Tratamientos	2	24,74	12,37	36,748	0,008	**
Error experimental	3	1,01	0,34			
Total	5	25,75				

Nota: GL = grados de libertad; SC = suma de cuadrados; CM = media cuadrática; FC = F calculada; Sig = significancia.

**p < 0,01 = altamente significativo.

Los resultados obtenidos del análisis de varianza (ANVA) al parámetro temperatura, permiten observar que la diferencia de medias entre los tratamientos considerados es altamente significativa. Por lo tanto, se acepta la hipótesis de que al menos uno de los efectos de los tratamientos sobre la temperatura es diferente.

Tabla 40

Prueba de comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador temperatura, a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 7 días

Nº	Tratamientos	\bar{x} (°C)	Sig	Mérito
1	A ₁ B ₁ : 0,5 (m ³ /día)/m ² + 7 días de retención	21,05	a	1º
2	A ₂ B ₁ : 1 (m ³ /día)/m ² + 7 días de retención	21,35	a	1º
3	A ₀ B ₀ : Grupo control	25,50	b	2º

Los resultados de la prueba de Tukey muestran que ambos tratamientos propuestos (A_1B_1 y A_2B_1) fueron los más efectivos en la reducción de la temperatura para este sistema, con promedios de 21,05 y 21,35 °C, respectivamente; seguido en segundo y último lugar por el grupo control.

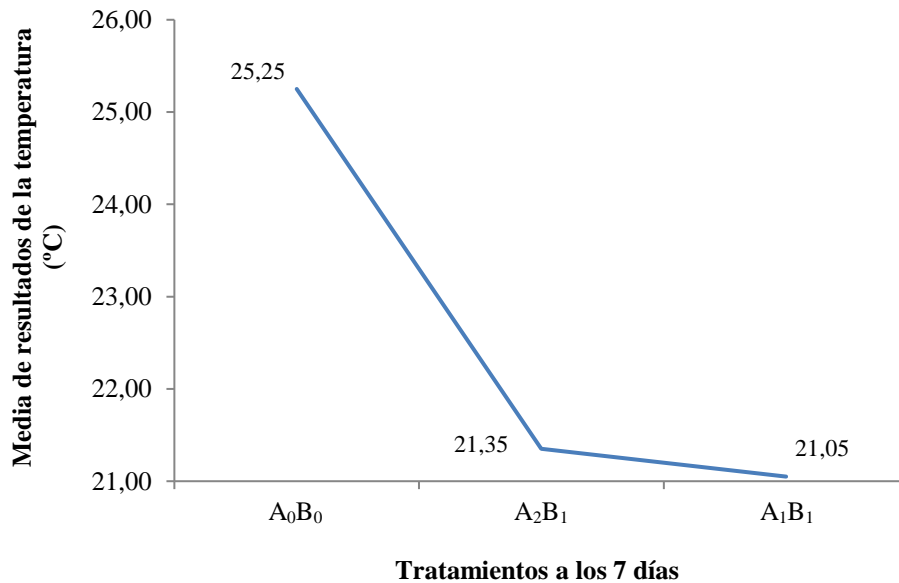


Figura 13. Comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador temperatura, a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 7 días

Nota: A_0B_0 = grupo control; A_2B_1 = tratamiento con lombrices a una tasa de riego de 1 (m³/día)/m² + 7 días de tratamiento con jacinto de agua; A_1B_1 = tratamiento con lombrices a una tasa de riego de 0,5 (m³/día)/m² + 7 días de tratamiento con jacinto de agua.

Finalmente, según la figura 13, y reafirmando lo mostrado por la tabla 40, ambos tratamientos propuestos (A_1B_1 y A_2B_1) son los más efectivos en la reducción de la temperatura para este sistema a los 7 días, lográndose en sus efluentes valores medios de 21,05 y 21,35 °C, respectivamente.

➤ *Sólidos totales en suspensión (STS)*

Tabla 41

Resultados de los STS a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 7 días

Tratamientos	Repeticiones	
	r ₁ (mg/L)	r ₂ (mg/L)
A ₁ B ₁ : 0,5 (m ³ /día)/m ² + 7 días de retención	3,00	2,90
A ₂ B ₁ : 1 (m ³ /día)/m ² + 7 días de retención	6,00	5,70
A ₀ B ₀ : Grupo control	99,00	99,00

Fuente: UOLASAT, 2018; LABINVSERV, 2018

En la tabla 41 se pueden apreciar los valores del parámetro STS, obtenidos a la salida de los tratamientos propuestos (A₁B₁ y A₂B₁) y el grupo control (A₀B₀), cada uno con dos repeticiones.

Tabla 42

Comparación de medias de los STS a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 7 días

Ttos.	N	Media	Error estándar	95 % del intervalo de confianza para la media	
				Límite inferior	Límite superior
A ₁ B ₁	2	2,95	0,05	2,31	3,59
A ₂ B ₁	2	5,85	0,15	4,94	8,76
A ₀ B ₀	2	99,00	0,00	99,00	99,00
Total	6	35,93	19,85	-14,76	87,29

En la tabla 42 puede observarse que el contenido promedio de STS a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 7 días fue de 2,95 mg/L para A₁B₁ y de 5,85 mg/L para A₂B₁. Mientras que, para el grupo control el contenido medio de STS fue de 99,00 mg/L.

Tabla 43

Análisis de varianza para los STS a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 7 días

Fuentes de variación	GL	SC	CM	FC	p-value	Sig
Tratamientos	2	11 940,62	5910,31	358 218,700	0,000	**
Error experimental	3	0,05	0,02			
Total	5	11 940,67				

Nota: GL = grados de libertad; SC = suma de cuadrados; CM = media cuadrática; FC = F calculada; Sig = significancia.

**p < 0,01 = altamente significativo.

El análisis de varianza (ANVA) para el parámetro STS, muestra que la diferencia de medias entre los tratamientos considerados es altamente significativa. Por lo cual, se acepta la hipótesis de que al menos uno de los efectos de los tratamientos sobre los STS es diferente.

Tabla 44

Prueba de comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador STS, a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 7 días

Nº	Tratamientos	\bar{x} (mg/L)	Sig	Mérito
1	A ₁ B ₁ : 0,5 (m ³ /día)/m ² + 7 días de retención	2,95	a	1º
2	A ₂ B ₁ : 1 (m ³ /día)/m ² + 7 días de retención	5,85	b	2º
3	A ₀ B ₀ : Grupo control	99,00	c	3º

Los resultados de la prueba de Tukey muestran que el tratamiento más efectivo en la remoción de STS para este sistema a los 7 días fue A₁B₁, con un promedio de 2,95 mg/L, seguido en segundo lugar por A₂B₁, con un promedio de 5,85 mg/L, y en tercer y último lugar por el grupo control.

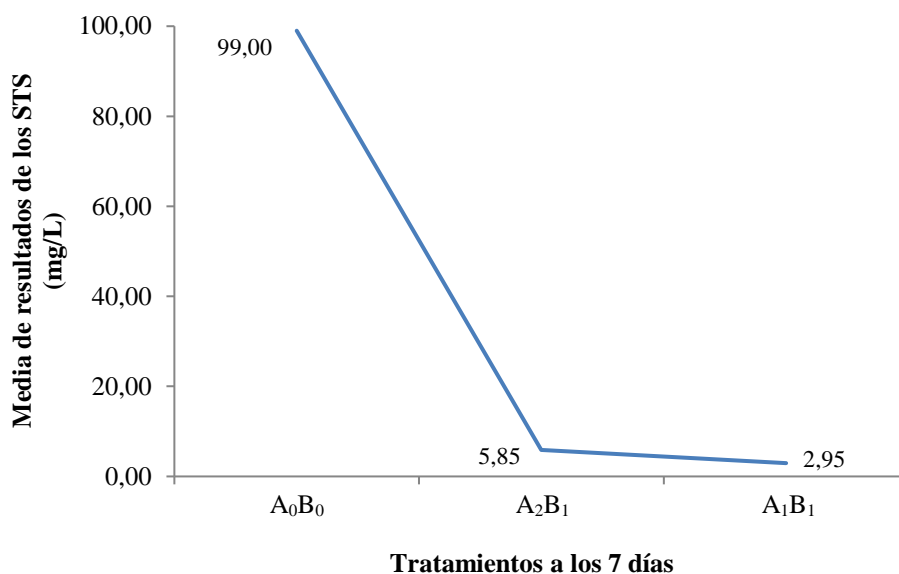


Figura 14. Comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador STS, a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 7 días

Nota: A₀B₀ = grupo control; A₂B₁ = tratamiento con lombrices a una tasa de riego de 1 (m³/día)/m² + 7 días de tratamiento con jacinto de agua; A₁B₁ = tratamiento con lombrices a una tasa de riego de 0,5 (m³/día)/m² + 7 días de tratamiento con jacinto de agua.

Finalmente, según la figura 14, y reafirmando lo mostrado por la tabla 44, el tratamiento más efectivo para la remoción de STS para este sistema a los 7 días es A₁B₁, alcanzándose una media de 2,95 mg/L en el efluente.

➤ pH

Tabla 45

Resultados del pH a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 7 días

Tratamientos	Repeticiones	
	r ₁ (unidad)	r ₂ (unidad)
A ₁ B ₁ : 0,5 (m ³ /día)/m ² + 7 días de retención	7,68	7,75
A ₂ B ₁ : 1 (m ³ /día)/m ² + 7 días de retención	7,48	7,38
A ₀ B ₀ : Grupo control	7,38	7,38

En la tabla 45 se pueden apreciar los valores del parámetro pH obtenidos a la salida de los tratamientos propuestos (A_1B_1 y A_2B_1) y el grupo control (A_0B_0), cada uno con dos repeticiones.

Tabla 46

Comparación de medias del pH a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 7 días

Ttos.	N	Media	Error estándar	95 % del intervalo de confianza para la media	
				Límite inferior	Límite superior
A_1B_1	2	7,72	0,04	7,27	8,16
A_2B_1	2	7,43	0,05	6,79	8,07
A_0B_0	2	7,38	0,00	7,38	7,38
Total	6	7,51	0,07	7,33	7,68

Los resultados de la tabla 46 muestran que el pH promedio a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 7 días fue de 7,72 para A_1B_1 , y de 7,43 para A_2B_1 . Mientras que el pH medio para el grupo control fue de 7,38 unidades.

Tabla 47

Análisis de varianza para el pH a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 7 días

Fuentes de variación	GL	SC	CM	FC	p-value	Sig
Tratamientos	2	0,13	0,07	26,302	0,013	*
Error experimental	3	0,01	0,00			
Total	5	0,14				

Nota: GL = grados de libertad; SC = suma de cuadrados; CM = media cuadrática; FC = F calculada; Sig = significancia.

* $p < 0,05$ = significativo.

El análisis de varianza (ANVA) para el parámetro pH, permite observar que la diferencia de medias entre los tratamientos considerados es significativa.

Por lo que se acepta la hipótesis de que al menos uno de los efectos de los tratamientos sobre el pH es distinto.

Tabla 48

Prueba de comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador pH, a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 7 días

Nº	Tratamientos	\bar{x} (unidad)	Sig	Mérito
1	A ₀ B ₀ : Grupo control	7,38	a	1º
2	A ₂ B ₁ : 1 (m ³ /día)/m ² + 7 días de retención	7,43	a	1º
3	A ₁ B ₁ : 0,5 (m ³ /día)/m ² + 7 días de retención	7,72	b	2º

Los resultados de la prueba de Tukey muestran que los tratamientos que presentaron valores de pH más próximos a la neutralidad para este sistema a los 7 días fueron A₂B₁ con un promedio de 7,43 unidades, y el grupo control, con 7,38 unidades, seguidos en segundo y último lugar por A₁B₁, con un promedio de 7,72.

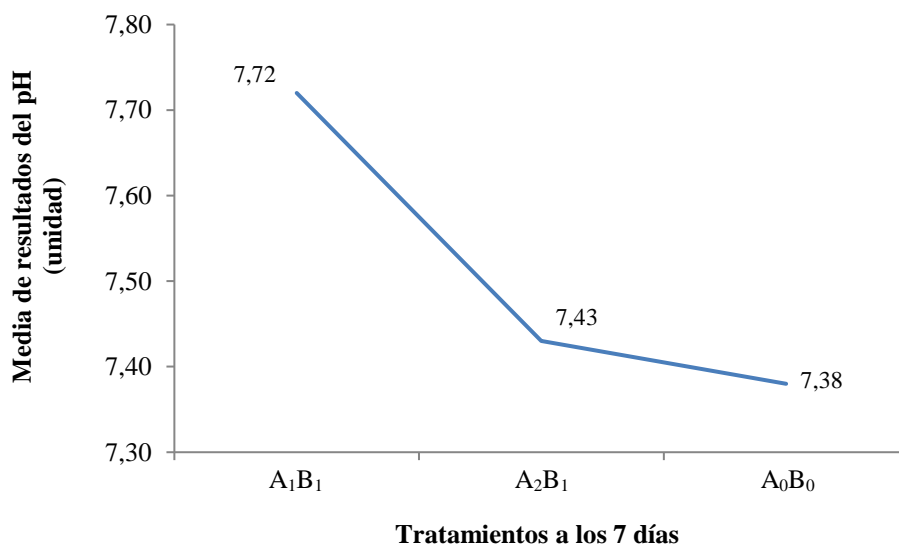


Figura 15. Comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador pH, a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 7 días

Nota: A₁B₁ = tratamiento con lombrices a una tasa de riego de 0,5 (m³/día)/m² + 7 días de tratamiento con jacinto de agua; A₂B₁ = tratamiento con lombrices a una tasa de riego de 1 (m³/día)/m² + 7 días de tratamiento con jacinto de agua; A₀B₀ = grupo control.

Finalmente, según la figura 15, y de acuerdo a la tabla 48, los tratamientos que mantuvieron valores de pH más próximos a la neutralidad para este sistema a los 7 días fueron A₂B₁ y el grupo control, con valores medios de 7,43 y 7,38 unidades.

➤ *Demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅)*

Tabla 49

Resultados de la DBO₅ a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 7 días

Tratamientos	Repeticiones	
	r1 (mg/L)	r2 (mg/L)
A ₁ B ₁ : 0,5 (m ³ /día)/m ² + 7 días de retención	3,90	3,70
A ₂ B ₁ : 1 (m ³ /día)/m ² + 7 días de retención	3,10	3,30
A ₀ B ₀ : Grupo control	188,13	188,13

Fuente: UOLASAT, 2018; LABINVSERV, 2018

En la tabla 49 se pueden apreciar los valores del parámetro DBO₅, obtenidos a la salida de los tratamientos propuestos (A₁B₁ y A₂B₁) y el grupo control (A₀B₀), cada uno con dos repeticiones.

Tabla 50

Comparación de medias de la DBO₅ a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 7 días

Ttos.	N	Media	Error estándar	95 % del intervalo de confianza para la media	
				Límite inferior	Límite superior
A ₁ B ₁	2	3,80	0,10	2,53	5,07
A ₂ B ₁	2	3,20	0,10	1,93	4,47
A ₀ B ₀	2	188,13	0,00	188,13	188,13
Total	6	65,04	38,92	-35,01	165,10

En la tabla 50 se muestra que la DBO₅ a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 7 días, fue de 3,80 mg/L para A₁B₁, y de 3,20 mg/L para A₂B₁; mientras que para el grupo control fue de 188,13 mg/L, en promedio.

Tabla 51

Análisis de varianza para la DBO₅ a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 7 días

Fuentes de variación	GL	SC	CM	FC	p-value	Sig
Tratamientos	2	45 451,34	22 725,67	1 704 425,345	0,000	**
Error experimental	3	0,40	0,01			
Total	5	45 451,38				

Nota: GL = grados de libertad; SC = suma de cuadrados; CM = media cuadrática; FC = F calculada; Sig = significancia.

**p < 0,01 = altamente significativo.

Los resultados del análisis de varianza (ANVA) aplicado al parámetro DBO₅, permiten observar que la diferencia de medias entre los tratamientos considerados es altamente significativa. De modo que se acepta la hipótesis de que al menos uno de los efectos de los tratamientos sobre la DBO₅ es diferente.

Tabla 52

Prueba de comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador DBO₅, a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 7 días

Nº	Tratamientos	\bar{x} (mg/L)	Sig	Mérito
1	A ₂ B ₁ : 1 (m ³ /día)/m ² + 7 días de retención	3,20	a	1º
2	A ₁ B ₁ : 0,5 (m ³ /día)/m ² + 7 días de retención	3,80	b	2º
3	A ₀ B ₀ : Grupo control	188,13	c	3º

Los resultados de la prueba de Tukey muestran que el tratamiento más efectivo en la remoción de DBO₅ para este sistema a los 7 días fue A₂B₁, con un promedio de 3,20 mg/L; seguido en segundo lugar por A₁B₁, con un promedio de 3,80 mg/L, y en tercer y último lugar por el grupo control.

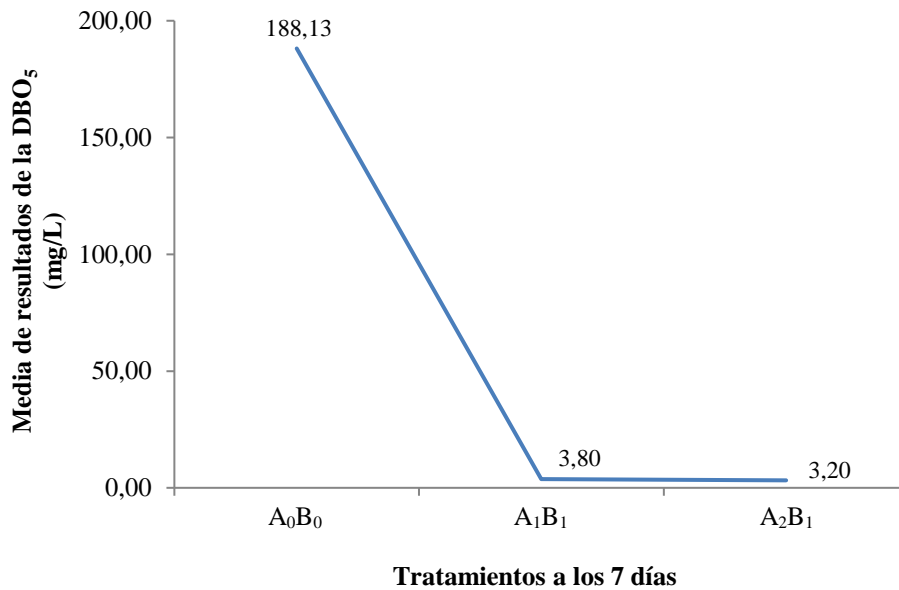


Figura 16. Comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador DBO₅, a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 7 días

Nota: A₀B₀ = grupo control; A₁B₁ = tratamiento con lombrices a una tasa de riego de 0,5 (m³/día)/m² + 7 días de tratamiento con jacinto de agua; A₂B₁ = tratamiento con lombrices a una tasa de riego de 1 (m³/día)/m² + 7 días de tratamiento con jacinto de agua.

Finalmente, según la figura 16, y de acuerdo a lo observado en la tabla 52, el tratamiento más efectivo en la remoción de la DBO₅ para este sistema a los 7 días es A₂B₁, alcanzándose una media de 3,20 mg/L en el efluente.

➤ *Coliformes termotolerantes*

Tabla 53

Resultados de las coliformes termotolerantes a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 7 días

Tratamientos	Repeticiones	
	r1 (NMP/100 mL)	r2 (NMP/100 mL)
A ₁ B ₁ : 0,5 (m ³ /día)/m ² + 7 días de retención	1,30 x 10 ²	1,20 x 10 ²
A ₂ B ₁ : 1 (m ³ /día)/m ² + 7 días de retención	2,20 x 10	2,00 x 10
A ₀ B ₀ : Grupo control	2,40 x 10 ⁷	2,40 x 10 ⁷

Fuente: Laboratorio de salud ambiental de la Subgerencia de Salud Ambiental Moquegua, 2018

En la tabla 53 se pueden apreciar los valores del parámetro coliformes termotolerantes, obtenidos a la salida de los tratamientos propuestos (A₁B₁ y A₂B₁) y el grupo control (A₀B₀), cada uno con dos repeticiones.

Tabla 54

Comparación de medias de las coliformes termotolerantes a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 7 días

Ttos.	N	Media	Error estándar	95 % del intervalo de confianza para la media	
				Límite inferior	Límite superior
A ₁ B ₁	2	125,00	5,00	61,47	188,53
A ₂ B ₁	2	21,00	1,00	8,29	33,71
A ₀ B ₀	2	2,40 x 10 ⁷	0,00	24 000 000,00	24 000 000,00
Total	6	8 000 048,67	5059628,87	-5 006 141,39	21 006 238,73

Los resultados de la tabla 54 muestran que el contenido promedio de coliformes termotolerantes a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 7 días fue de 1,25 x 10² NMP/100 mL para A₁B₁, y de 2,10 x 10 NMP/100 mL

para A₂B₁; mientras que para el grupo control la media fue de 2,40 x 10⁷ NMP/100 mL.

Tabla 55

Análisis de varianza para las coliformes termotolerantes a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 7 días

Fuentes de variación	GL	SC	CM	FC	p-value	Sig
Tratamientos	2	7,68 x 10 ¹⁴	3,84 x 10 ¹⁴	2,215 x 10 ¹³	0,000	**
Error experimental	3	52,00	17,33			
Total	5	7,68 x 10 ¹⁴				

Nota: GL = grados de libertad; SC = suma de cuadrados; CM = media cuadrática; FC = F calculada; Sig = significancia.

**p < 0,01 = altamente significativo.

El análisis de varianza (ANVA) para el parámetro coliformes termotolerantes, muestra que la diferencia de medias entre los tratamientos considerados es altamente significativa. De acuerdo con esto, se acepta la hipótesis de que por lo menos el efecto de uno de los tratamientos sobre las coliformes termotolerantes es diferente.

Tabla 56

Prueba de comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador coliformes termotolerantes, a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 7 días

Nº	Tratamientos	\bar{x} (NMP/100 mL)	Sig	Mérito
1	A ₂ B ₁ : 1 (m ³ /día)/m ² + 7 días de retención	21,00	a	1º
2	A ₁ B ₁ : 0,5 (m ³ /día)/m ² + 7 días de retención	125,00	b	2º
3	A ₀ B ₀ : Grupo control	24 000 000,00	c	3º

Los resultados de la prueba de Tukey muestran que el tratamiento más efectivo en la remoción de coliformes termotolerantes para este sistema a los 7 días fue A₂B₁, con un promedio de 21,00 NMP/100 mL; seguido en segundo lugar por A₁B₁, con un promedio de 125,00 NMP/100 mL, y en tercer y último lugar por el grupo control.

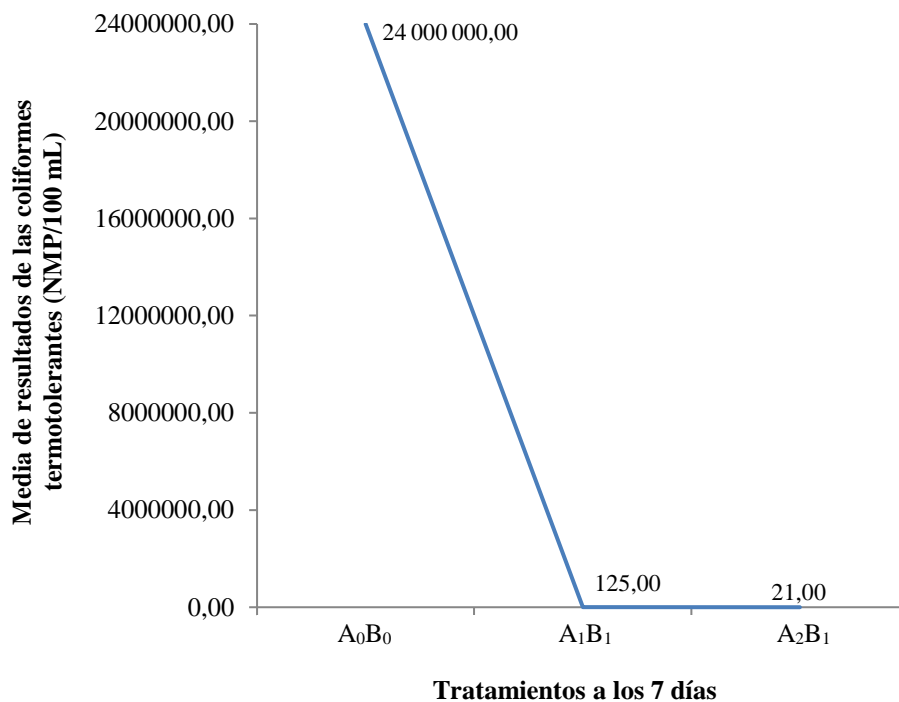


Figura 17. Comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador coliformes termotolerantes, a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 7 días

Nota: A₀B₀ = grupo control; A₁B₁ = tratamiento con lombrices a una tasa de riego de 0,5 (m³/día)/m² + 7 días de tratamiento con jacinto de agua; A₂B₁ = tratamiento con lombrices a una tasa de riego de 1 (m³/día)/m² + 7 días de tratamiento con jacinto de agua.

Finalmente, según la figura 17, y de acuerdo a lo mostrado por la tabla 56, se observa que el tratamiento más efectivo en la remoción de coliformes termotolerantes para este sistema a los 7 días es A₂B₁, alcanzándose una media de 21,00 NMP/100 mL en el efluente.

c. Resultados a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 14 días.

Tabla 57

Resultados a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 14 días

Parámetro	Unidad	Efluente 2		Efluente 2		Efluente 2	
		A ₁ B ₂		A ₂ B ₂		A ₀ B ₀	
		r ₁	r ₂	r ₁	r ₂	r ₁	r ₂
Parámetros físicos							
Temperatura	°C	19,40	19,80	19,90	20,10	25,50	25,50
Sólidos totales en suspensión	mg/L	7,00	6,70	6,40	6,00	99,00	99,00
Parámetros químicos							
pH	unidad	7,54	7,46	7,41	7,40	7,38	7,38
DBO ₅	mg/L	3,10	2,90	<2,00	<2,00	188,13	188,13
Parámetros microbiológicos							
Coliformes termotolerantes	NMP/100 mL	<1,80	<1,80	2,00	<1,80	2,4x10 ⁷	2,4x10 ⁷

Nota: A₁B₂ = tratamiento con lombrices a una tasa de riego de 0,5 (m³/día)/m² + 14 días de tratamiento con jacinto de agua; A₂B₂ = tratamiento con lombrices a una tasa de riego de 1 (m³/día)/m² + 14 días de tratamiento con jacinto de agua; A₀B₀ = grupo control; r₁ = primera repetición; r₂ = segunda repetición.

Fuente: UOLASAT, 2018; LABINVSERV, 2018; Laboratorio de salud ambiental de la Subgerencia de Salud Ambiental Moquegua, 2018

En la tabla 57 se muestran los resultados obtenidos luego del análisis fisicoquímico y microbiológico del efluente a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua (A₁B₂ y A₂B₂), a los 14 días.

Los efluentes de los tratamientos propuestos (A₁B₂ y A₂B₂) presentaron temperaturas inferiores a la del grupo control, apreciándose diferencias poco significativas entre ellos, con valores desde 19,40 °C hasta 20,10 °C. Asimismo,

todos los valores se encuentran dentro de los indicados por el Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM, para temperatura (<35 °C).

Los sólidos totales en suspensión a la salida de los tratamientos propuestos presentaron valores inferiores al del grupo control, y alcanzaron entre 6,00 y 7,00 mg/L; siendo A₂B₂ el tratamiento en el que se obtuvieron las concentraciones más bajas de este parámetro, con 6,40 y 6,00 mg/L. Así mismo, en ambos casos se puede apreciar que los valores obtenidos se encuentran dentro del límite de 150 mg/L, indicado por el Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM.

En relación al grupo control, el pH presentó valores superiores a la salida de los tratamientos propuestos; sin embargo, A₂B₂ mostró un pH ligeramente menor, alcanzando valores de 7,41 y 7,40. Cabe mencionar que ninguno de los valores obtenidos sobrepasa el límite de 8,5, establecido en el Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM.

La DBO₅ de los tratamientos propuestos alcanzó valores por debajo de los 2,00 mg/L hasta 3,10 mg/L, significativamente inferiores a la del grupo control. Entre tratamientos, las concentraciones obtenidas no tuvieron una diferencia marcada entre sí, encontrándose dentro del límite de 100 mg/L, establecido para este parámetro en el Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM. Sin embargo, en promedio, se puede apreciar una remoción ligeramente mayor por parte de A₂B₂.

Finalmente, se observó una importante reducción de coliformes termotolerantes en los tratamientos propuestos, con relación al grupo control; sin embargo, no hubo diferencias significativas entre los tratamientos. Por otro lado, cabe destacar que todos los efluentes a la salida de los tratamientos propuestos cumplen los límites establecidos en el Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM y en las Directrices recomendadas por la OMS sobre la calidad microbiológica de

las aguas residuales empleadas en agricultura (10 000 y 1000 NMP/100 mL, respectivamente).

d. *Análisis estadístico por parámetro de evaluación a los 14 días.*

➤ *Temperatura*

Tabla 58

Resultados de la temperatura a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 14 días

Tratamientos	Repeticiones	
	r1 (°C)	r2 (°C)
A ₁ B ₂ : 0,5 (m ³ /día)/m ² + 14 días de retención	19,40	19,80
A ₂ B ₂ : 1 (m ³ /día)/m ² + 14 días de retención	19,90	20,10
A ₀ B ₀ : Grupo control	25,50	25,50

En la tabla 58 se pueden observar los valores del parámetro temperatura obtenidos a la salida de los tratamientos propuestos (A₁B₂ y A₂B₂) y el grupo control (A₀B₀), cada uno con dos repeticiones.

Tabla 59

Comparación de medias de la temperatura a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 14 días

Ttos.	N	Media	Error estándar	95 % del intervalo de confianza para la media	
				Límite inferior	Límite superior
A ₁ B ₂	2	19,60	0,20	17,06	22,14
A ₂ B ₂	2	20,00	0,10	18,73	21,27
A ₀ B ₀	2	25,50	0,00	25,50	25,50
Total	6	21,70	1,21	18,60	24,80

En la tabla 59 puede observarse que la temperatura media para la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 14 días fue de 19,60 °C para A₁B₂, y 20,00 °C para A₂B₂. Mientras la temperatura media para el grupo control fue de 25,50 °C.

Tabla 60

Análisis de varianza para la temperatura a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 14 días

Fuentes de variación	GL	SC	CM	FC	p-value	Sig
Tratamientos	2	43,48	21,74	652,200	0,000	**
Error experimental	3	0,10	0,03			
Total	5	43,58				

Nota: GL = grados de libertad; SC = suma de cuadrados; CM = media cuadrática; FC = F calculada; Sig = significancia.

**p < 0,01 = altamente significativo.

Los resultados obtenidos del análisis de varianza (ANVA) al parámetro temperatura, permiten observar que la diferencia de medias entre los tratamientos considerados es altamente significativa. Por lo tanto, se acepta la hipótesis de que al menos uno de los efectos de los tratamientos sobre la temperatura es diferente.

Tabla 61

Prueba de comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador temperatura, a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 14 días

Nº	Tratamientos	\bar{x} (°C)	Sig	Mérito
1	A ₁ B ₂ : 0,5 (m ³ /día)/m ² + 14 días de retención	19,60	a	1º
2	A ₂ B ₂ : 1 (m ³ /día)/m ² + 14 días de retención	20,00	a	1º
3	A ₀ B ₀ : Grupo control	25,50	b	2º

Los resultados de la prueba de Tukey muestran que ambos tratamientos propuestos (A_1B_2 y A_2B_2) fueron los más efectivos en la reducción de la temperatura para este sistema a los 14 días, con promedios de 19,60 y 20,00 °C, de forma respectiva; seguidos en segundo y último lugar por el grupo control.

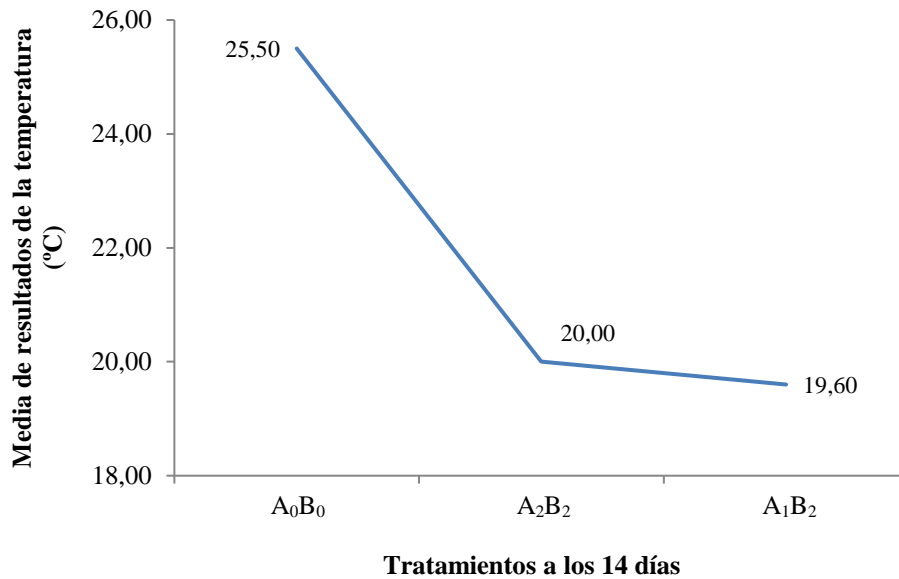


Figura 18. Comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador temperatura, a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 14 días

Nota: A_0B_0 = grupo control; A_2B_2 = tratamiento con lombrices a una tasa de riego de $1 \text{ (m}^3\text{/día)/m}^2$ + 14 días de tratamiento con jacinto de agua; A_1B_2 = tratamiento con lombrices a una tasa de riego de $0,5 \text{ (m}^3\text{/día)/m}^2$ + 14 días de tratamiento con jacinto de agua.

Finalmente, según la figura 18, y reafirmando lo mostrado por la tabla 61, tanto A_1B_2 como A_2B_2 son los tratamientos más efectivos en la reducción de la temperatura para este sistema a los 14 días, lográndose en sus efluentes una temperatura media de 19,60 y 20,00 °C, respectivamente.

➤ *Sólidos totales en suspensión (STS)*

Tabla 62

Resultados de los STS a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 14 días

Tratamientos	Repeticiones	
	r1 (mg/L)	r2 (mg/L)
A ₁ B ₂ : 0,5 (m ³ /día)/m ² + 14 días de retención	7,00	6,70
A ₂ B ₂ : 1 (m ³ /día)/m ² + 14 días de retención	6,40	6,00
A ₀ B ₀ : Grupo control	99,00	99,00

Fuente: UOLASAT, 2018; LABINVSERV, 2018

En la tabla 62 se pueden apreciar los valores del parámetro STS, obtenidos a la salida de los tratamientos propuestos (A₁B₂ y A₂B₂) y el grupo control (A₀B₀), cada uno con dos repeticiones.

Tabla 63

Comparación de medias de los STS a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 14 días

Ttos.	N	Media	Error estándar	95 % del intervalo de confianza para la media	
				Límite inferior	Límite superior
A ₁ B ₂	2	6,85	0,15	4,94	8,76
A ₂ B ₂	2	6,20	0,20	3,66	8,74
A ₀ B ₀	2	99,00	0,00	99,00	99,00
Total	6	37,35	19,50	-12,77	87,47

La tabla 63 muestra que el contenido promedio de STS a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 14 días fue 6,85 mg/L para A₁B₂, y 6,20 mg/L para A₂B₂. Mientras que, para el grupo control, el contenido medio de STS fue de 99,00 mg/L.

Tabla 64

Análisis de varianza para los STS a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 14 días

Fuentes de variación	GL	SC	CM	FC	p-value	Sig
Tratamientos	2	11 402,59	5701,30	136 831,080	0,000	**
Error experimental	3	0,13	0,04			
Total	5	11 402,72				

Nota: GL = grados de libertad; SC = suma de cuadrados; CM = media cuadrática; FC = F calculada; Sig = significancia.

**p < 0,01 = altamente significativo.

El análisis de varianza (ANVA) para el parámetro STS, muestra que la diferencia de medias entre tratamientos es altamente significativa. Por lo que, se acepta la hipótesis de que al menos uno de los efectos de los tratamientos sobre los STS es distinto.

Tabla 65

Prueba de comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador STS, a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 14 días

Nº	Tratamientos	\bar{x} (mg/L)	Sig	Mérito
1	A ₂ B ₂ : 1 (m ³ /día)/m ² + 14 días de retención	6,20	a	1°
2	A ₁ B ₂ : 0,5 (m ³ /día)/m ² + 14 días de retención	6,85	a	1°
3	A ₀ B ₀ : Grupo control	99,00	b	2°

Los resultados de la prueba de Tukey muestran que ambos tratamientos propuestos (A₂B₂ y A₁B₂) fueron los más efectivos en la remoción de STS para este sistema a los 14 días, con promedios de 6,20 y 6,85 mg/L; seguidos en segundo y último lugar por el grupo control.

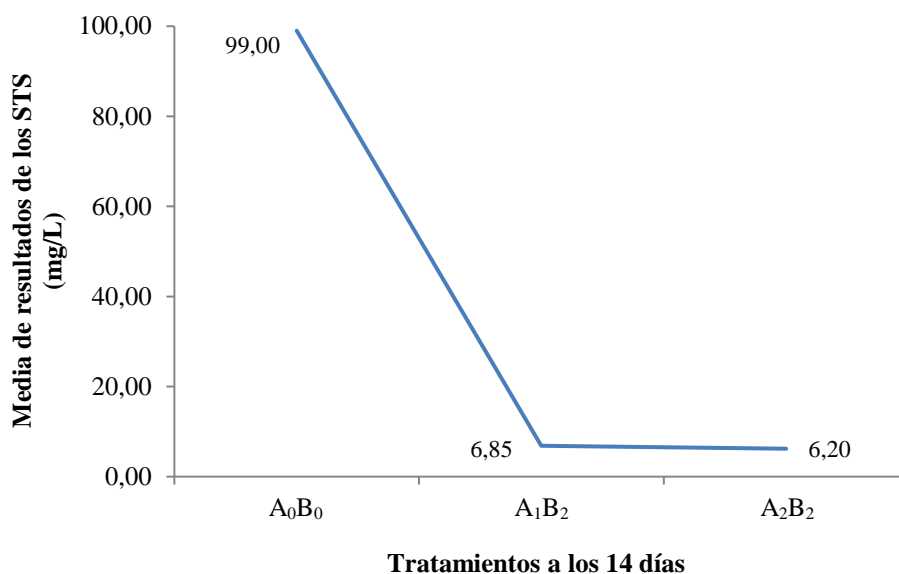


Figura 19. Comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador STS, a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 14 días

Nota: A₀B₀ = grupo control; A₂B₂ = tratamiento con lombrices a una tasa de riego de 1 (m³/día)/m² + 14 días de tratamiento con jacinto de agua; A₁B₂ = tratamiento con lombrices a una tasa de riego de 0,5 (m³/día)/m² + 14 días de tratamiento con jacinto de agua.

Finalmente, según la figura 19, y de acuerdo a la tabla 65, ambos tratamientos propuestos (A₂B₂ y A₁B₂) son los más efectivos para la remoción de STS para este sistema a los 14 días, alcanzándose una media de 6,20 y 6,85 mg/L en el efluente.

➤ pH

Tabla 66

Resultados del pH a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 14 días

Tratamientos	Repeticiones	
	r ₁ (unidad)	r ₂ (unidad)
A ₁ B ₂ : 0,5 (m ³ /día)/m ² + 14 días de retención	7,54	7,46
A ₂ B ₂ : 1 (m ³ /día)/m ² + 14 días de retención	7,41	7,40
A ₀ B ₀ : Grupo control	7,38	7,38

En la tabla 66 se puede apreciar los valores del parámetro pH obtenidos a la salida de los tratamientos propuestos (A₁B₂ y A₂B₂) y el grupo control (A₀B₀), cada uno con dos repeticiones.

Tabla 67

Comparación de medias del pH a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 14 días

Ttos.	N	Media	Error estándar	95 % del intervalo de confianza para la media	
				Límite inferior	Límite superior
A ₁ B ₂	2	7,50	0,04	6,99	8,01
A ₂ B ₂	2	7,41	0,01	7,34	7,47
A ₀ B ₀	2	7,38	0,00	7,38	7,38
Total	6	7,43	0,03	7,36	7,49

Los resultados de la tabla 67 muestran que el pH promedio a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 14 días fue de 7,50 para A₁B₂, y de 7,41 para A₂B₂; mientras que el pH promedio para el grupo control fue de 7,38.

Tabla 68

Análisis de varianza para el pH a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 14 días

Fuentes de variación	GL	SC	CM	FC	p-value	Sig
Tratamientos	2	0,02	0,01	7,400	0,069	NS
Error experimental	3	0,00	0,00			
Total	5	0,02				

Nota: GL = grados de libertad; SC = suma de cuadrados; CM = media cuadrática; FC = F calculada; Sig = significancia.

NS = no significativo.

El análisis de varianza (ANVA) aplicado al parámetro el parámetro pH, permite ver que la diferencia de medias entre los tratamientos considerados no es

significativa. Por lo que se acepta la hipótesis nula de que los efectos de los tratamientos son iguales.

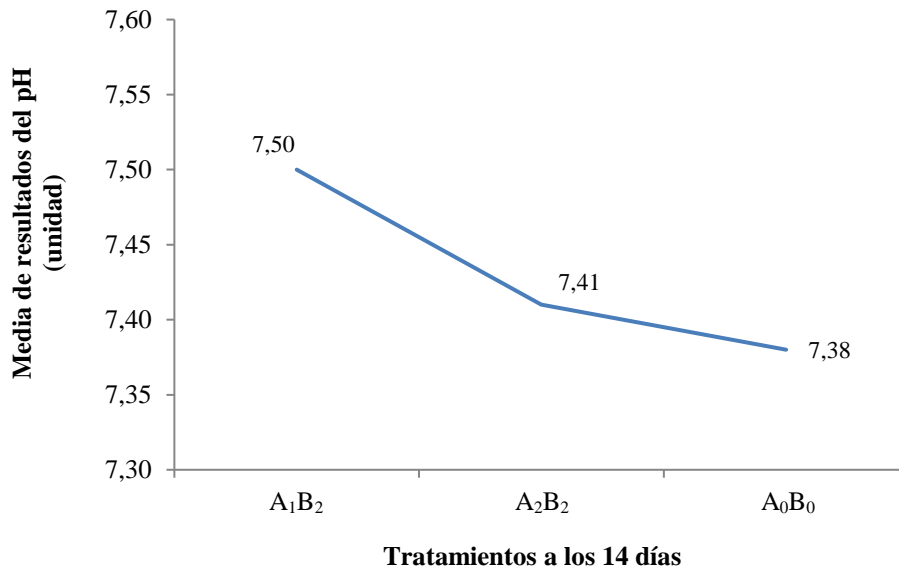


Figura 20. Comparación de medias del indicador pH, a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 14 días

Nota: A₁B₂ = tratamiento con lombrices a una tasa de riego de 0,5 (m³/día)/m² + 14 días de tratamiento con jacinto de agua; A₂B₂ = tratamiento con lombrices a una tasa de riego de 1 (m³/día)/m² + 14 días de tratamiento con jacinto de agua; A₀B₀ = grupo control.

Finalmente, según la figura 20, y de acuerdo a lo expuesto en la tabla 68, tanto los tratamientos propuestos (A₁B₂ y A₂B₂) como el grupo control presentaron valores de pH estadísticamente iguales.

➤ *Demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅)*

Tabla 69

Resultados de la DBO₅ a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 14 días

Tratamientos	Repeticiones	
	r1 (mg/L)	r2 (mg/L)
A ₁ B ₂ : 0,5 (m ³ /día)/m ² + 14 días de retención	3,10	2,90
A ₂ B ₂ : 1 (m ³ /día)/m ² + 14 días de retención	2,00	2,00
A ₀ B ₀ : Grupo control	188,13	188,13

Fuente: UOLASAT, 2018; LABINVSERV, 2018

En la tabla 69 se pueden apreciar los valores del parámetro DBO₅, obtenidos a la salida de los tratamientos propuestos (A₁B₂ y A₂B₂) y el grupo control (A₀B₀), cada uno con dos repeticiones.

Tabla 70

Comparación de medias de la DBO₅ a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 14 días

Ttos.	N	Media	Error estándar	95 % del intervalo de confianza para la media	
				Límite inferior	Límite superior
A ₁ B ₂	2	3,00	0,10	1,73	4,27
A ₂ B ₂	2	2,00	0,00	2,00	2,00
A ₀ B ₀	2	188,13	0,00	188,13	188,13
Total	6	64,38	39,13	-36,22	164,98

En la tabla 70 se muestra que la DBO₅ a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 14 días, fue de 3,00 mg/L para A₁B₂, y de 2,00 mg/L para A₂B₂; mientras que para el grupo control fue de 188,13 mg/L, en promedio.

Tabla 71

Análisis de varianza para la DBO₅ a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 14 días

Fuentes de variación	GL	SC	CM	FC	p-value	Sig
Tratamientos	2	45 945,66	22 972,83	3 445 924,69	0,000	**
Error experimental	3	0,20	0,01			
Total	5	45 945,68				

Nota: GL = grados de libertad; SC = suma de cuadrados; CM = media cuadrática; FC = F calculada; Sig = significancia.

**p < 0,01 = altamente significativo.

El análisis de varianza (ANVA) aplicado al parámetro DBO₅, permite observar que la diferencia de medias entre los tratamientos considerados es

altamente significativa. De modo que, se acepta la hipótesis de que al menos uno de los efectos de los tratamientos sobre la DBO₅ es diferente.

Tabla 72

Prueba de comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador DBO₅, a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 14 días

Nº	Tratamientos	\bar{x} (mg/L)	Sig	Mérito
1	A ₂ B ₂ : 1 (m ³ /día)/m ² + 14 días de retención	2,00	a	1º
2	A ₁ B ₂ : 0,5 (m ³ /día)/m ² + 14 días de retención	3,00	b	2º
3	A ₀ B ₀ : Grupo control	188,13	c	3º

Los resultados de la prueba de Tukey muestran que el tratamiento más efectivo en la remoción de DBO₅ para este sistema a los 14 días fue A₂B₂, con un promedio de 2,00 mg/L, seguido en segundo lugar por A₁B₂, con un promedio de 3,00 mg/L, y en tercer y último lugar por el grupo control.

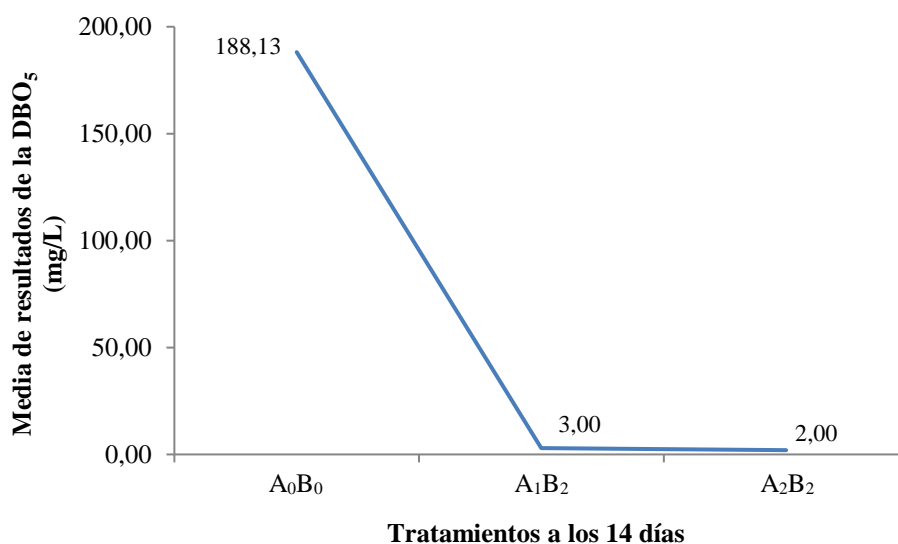


Figura 21. Comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador DBO₅, a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 14 días

Nota: A₀B₀ = grupo control; A₁B₂ = tratamiento con lombrices a una tasa de riego de 0,5 (m³/día)/m² + 14 días de tratamiento con jacinto de agua; A₂B₂ = tratamiento con lombrices a una tasa de riego de 1 (m³/día)/m² + 14 días de tratamiento con jacinto de agua.

Finalmente, según la figura 21, y reafirmando lo mostrado por la tabla 72, el tratamiento más efectivo para la remoción de DBO₅ para este sistema a los 14 días es A₂B₂, alcanzándose una media de 2,00 mg/L en el efluente.

➤ *Coliformes termotolerantes*

Tabla 73

Resultados de las coliformes termotolerantes a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 14 días

Tratamientos	Repeticiones	
	r1 (NMP/100 mL)	r2 (NMP/100 mL)
A ₁ B ₂ : 0,5 (m ³ /día)/m ² + 14 días de retención	<1,80	<1,80
A ₂ B ₂ : 1 (m ³ /día)/m ² + 14 días de retención	2,00	<1,80
A ₀ B ₀ : Grupo control	2,40 x 10 ⁷	2,40 x 10 ⁷

Fuente: Laboratorio de salud ambiental de la Subgerencia de Salud Ambiental Moquegua, 2018

En la tabla 73 se pueden apreciar los valores del parámetro coliformes termotolerantes, obtenidos a la salida de los tratamientos propuestos (A₁B₂ y A₂B₂) y el grupo control (A₀B₀), cada uno con dos repeticiones.

Tabla 74

Comparación de medias de las coliformes termotolerantes a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 14 días

Ttos.	N	Media	Error estándar	95 % del intervalo de confianza para la media	
				Límite inferior	Límite superior
A ₁ B ₁	2	1,80	0,00	1,80	1,80
A ₂ B ₁	2	1,90	0,10	0,63	3,17
A ₀ B ₀	2	2,40 x 10 ⁷	0,00	24 000 000,00	24 000 000,00
Total	6	8 000 001,23	5 059 643,87	-5 006 227,38	21 006 229,85

Los resultados de la tabla 74 muestran que el contenido promedio de coliformes termotolerantes a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 14 días fue de 1,80 NMP/100 mL para A₁B₂, y de 1,90 NMP/100 mL para A₂B₂; mientras que, para el grupo control, la media fue de 2,40 x 10⁷ NMP/100 mL.

Tabla 75

Análisis de varianza para las coliformes termotolerantes a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 14 días

Fuentes de variación	GL	SC	CM	FC	p-value	Sig
Tratamientos	2	7,68 x 10 ¹⁴	3,84 x 10 ¹⁴	5,760 x 10 ¹⁶	0,000	**
Error experimental	3	0,02	0,01			
Total	5	7,68 x 10 ¹⁴				

Nota: GL = grados de libertad; SC = suma de cuadrados; CM = media cuadrática; FC = F calculada; Sig = significancia.

**p < 0,01 = altamente significativo.

El análisis de varianza (ANVA) a las coliformes termotolerantes, muestra que la diferencia de medias entre los tratamientos considerados es altamente significativa. De acuerdo con esto, se acepta la hipótesis de que por lo menos el efecto de uno de los tratamientos sobre las coliformes termotolerantes es diferente.

Tabla 76

Prueba de comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador coliformes termotolerantes, a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 14 días

Nº	Tratamientos	\bar{x} (NMP/100 mL)	Sig	Mérito
1	A ₁ B ₂ : 0,5 (m ³ /día)/m ² + 14 días de retención	1,80	a	1º
2	A ₂ B ₂ : 1 (m ³ /día)/m ² + 14 días de retención	1,90	a	1º
3	A ₀ B ₀ : Grupo control	24 000 000,00	b	2º

Los resultados de la prueba de Tukey muestran que ambos tratamientos propuestos (A_1B_2 y A_2B_2) fueron los más efectivos en la remoción de coliformes termotolerantes para este sistema a los 14 días, con promedios de 1,80 y 1,90 NMP/100 mL, respectivamente; seguidos en segundo y último lugar por el grupo control.

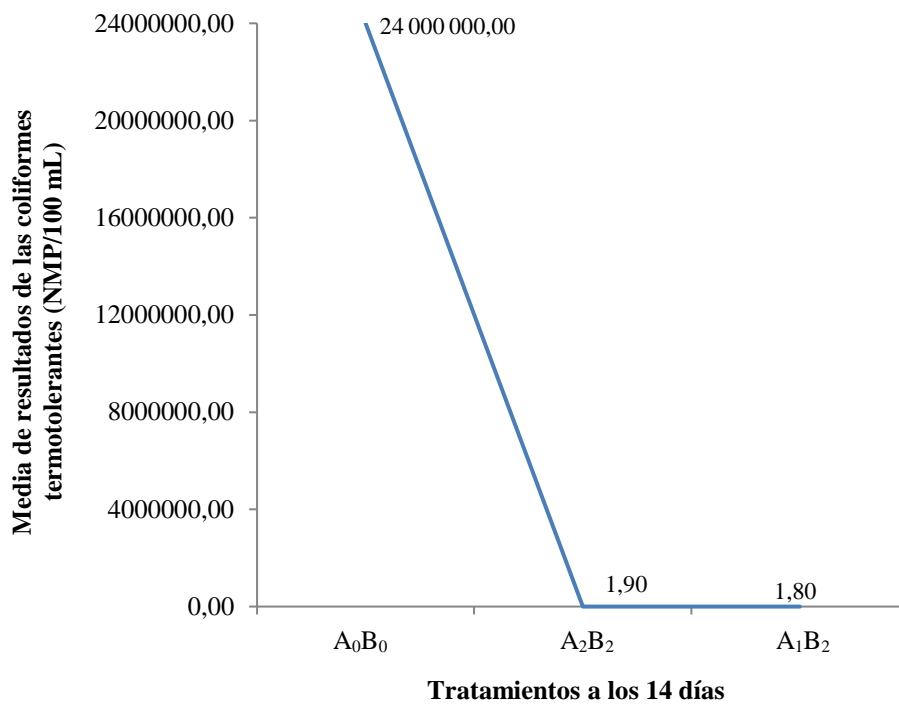


Figura 22. Comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador coliformes termotolerantes, a la salida de la fase de tratamiento con jacinto de agua a los 14 días

Nota: A_0B_0 = grupo control; A_2B_2 = tratamiento con lombrices a una tasa de riego de $1 \text{ (m}^3\text{/día)}/\text{m}^2$ + 14 días de tratamiento con jacinto de agua; A_1B_2 = tratamiento con lombrices a una tasa de riego de $0,5 \text{ (m}^3\text{/día)}/\text{m}^2$ + 14 días de tratamiento con jacinto de agua.

Finalmente, según la figura 22, y de acuerdo a la tabla 76, tanto A_1B_2 como A_2B_2 son los tratamientos más efectivos en la remoción de coliformes termotolerantes, lográndose en sus efluentes medias de 1,80 y 1,90 NMP/100 mL de forma respectiva.

4.1.2.3 Sistema de tratamiento C: Sistema de tratamiento con lombrices + jacinto de agua + hipoclorito de calcio ($Ca(ClO)_2$).

a. Resultados a la salida de la fase de tratamiento con hipoclorito de calcio.

Tabla 77

Resultados a la salida de la fase de tratamiento con hipoclorito de calcio

Parámetro	Unidad	Efluente 3		Efluente 3		Efluente 3	
		A ₁ B ₂ C ₁		A ₂ B ₂ C ₁		A ₀ B ₀ C ₀	
		r ₁	r ₂	r ₁	r ₂	r ₁	r ₂
Parámetros físicos							
Temperatura	°C	21,70	22,00	21,80	22,10	25,50	25,50
Sólidos totales en suspensión	mg/L	7,00	8,20	6,40	6,10	99,00	99,00
Parámetros químicos							
pH	unidad	7,87	7,85	7,75	7,80	7,38	7,38
DBO ₅	mg/L	<2,00	<2,00	1,70	<2,00	188,13	188,13
Parámetros microbiológicos							
Coliformes termotolerantes	NMP/100 mL	<1,80	<1,80	<1,80	2,00	2,4x10 ⁷	2,4x10 ⁷

Nota: A₁B₂C₁ = tratamiento con lombrices a una tasa de riego de 0,5 (m³/día)/m² + 14 días de tratamiento con jacinto de agua + cloración con hipoclorito de calcio; A₂B₂C₁ = tratamiento con lombrices a una tasa de riego de 1 (m³/día)/m² + 14 días de tratamiento con jacinto de agua + cloración con hipoclorito de calcio; A₀B₀C₀ = grupo control; r₁ = primera repetición; r₂ = segunda repetición. Fuente: UOLASAT, 2018; LABINVSERV, 2018; Laboratorio de salud ambiental de la Subgerencia de Salud Ambiental Moquegua, 2018

En la tabla 77 se muestran los resultados obtenidos luego del análisis fisicoquímico y microbiológico del efluente a la salida de la fase de tratamiento con cloración con hipoclorito de calcio.

Los efluentes de los tratamientos propuestos presentaron temperaturas inferiores a la del grupo control; apreciándose valores ligeramente menores en A₁B₂C₁, que alcanzó 21,70 y 22,00 °C. Sin embargo, todos los valores se

encuentran dentro de los indicados por el Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM para este parámetro (<35 °C).

Los sólidos totales en suspensión a la salida de los tratamientos propuestos presentaron valores inferiores al del grupo control, alcanzando entre 6,10 y 8,20 mg/L. En promedio, A₂B₂C₁ fue el tratamiento en el que se obtuvieron las concentraciones más bajas de este parámetro, con 6,40 y 6,10 mg/L. En ambos casos, los valores obtenidos se encuentran dentro del límite de 150 mg/L, indicado por el Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM.

En relación al grupo control, el pH experimentó valores superiores a la salida de los tratamientos propuestos, aproximándose a la basicidad. Entre tratamientos, no se apreció una diferencia marcada entre A₁B₂C₁ y A₂B₂C₁; sin embargo, un pH ligeramente más cercano a la neutralidad pudo observarse en A₂B₂C₁, alcanzando valores de 7,75 y 7,80. Sin embargo, en ninguno de los casos se llega a sobrepasar el límite de 8,5, establecido en el Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM.

La DBO₅ de los tratamientos propuestos se encuentra por debajo de 2,00 mg/L en todos los casos, siendo además muy inferiores a la del grupo control. Entre tratamientos, las concentraciones obtenidas no tuvieron una diferencia marcada entre sí, encontrándose dentro del límite de 100 mg/L, establecido para este parámetro en el Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM.

Finalmente, tanto en A₁B₂C₁ como en A₂B₂C₁, se observó una importante reducción de coliformes termotolerantes en relación al grupo control, mientras que entre tratamientos, los valores obtenidos no tuvieron diferencia alguna. Sin embargo, cabe destacar que todos los efluentes a la salida de los tratamientos propuestos cumplen los límites establecidos en el Decreto Supremo N° 003-2010-

MINAM y en las Directrices recomendadas por la OMS sobre la calidad microbiológica de las aguas residuales empleadas en agricultura (10 000 y 1000 NMP/100 mL, respectivamente).

b. Análisis estadístico por parámetro de evaluación.

➤ *Temperatura*

Tabla 78

Resultados de la temperatura a la salida de la fase de tratamiento con hipoclorito de calcio

Tratamientos	Repeticiones	
	r1 (°C)	r2 (°C)
A ₁ B ₂ C ₁ : 0,5 (m ³ /día)/m ² + 14 días de retención + Ca(ClO) ₂	21,70	22,00
A ₂ B ₂ C ₁ : 1 (m ³ /día)/m ² + 14 días de retención + Ca(ClO) ₂	21,80	22,10
A ₀ B ₀ C ₀ : Grupo control	25,50	25,50

En la tabla 78 se pueden apreciar los valores del parámetro temperatura, obtenidos a la salida de los tratamientos propuestos (A₁B₂C₁ y A₂B₂C₁) y el grupo control (A₀B₀C₀), cada uno con dos repeticiones.

Tabla 79

Comparación de medias de la temperatura a la salida de la fase de tratamiento con hipoclorito de calcio

Ttos.	N	Media	Error estándar	95 % del intervalo de confianza para la media	
				Límite inferior	Límite superior
A ₁ B ₂ C ₁	2	21,85	0,15	19,94	23,76
A ₂ B ₂ C ₁	2	21,95	0,15	20,04	23,86
A ₀ B ₀ C ₀	2	25,50	0,00	25,50	25,50
Total	6	23,10	0,76	21,14	25,06

Como se observa en la tabla 79, la temperatura media a la salida de la fase de tratamiento con hipoclorito de calcio fue de 21,85 °C para A₁B₂C₁ y de 21,95 °C para A₂B₂C₁. Por otro lado, la temperatura media para el grupo control fue 25,50 °C.

Tabla 80

Análisis de varianza para la temperatura a la salida de la fase de tratamiento con hipoclorito de calcio

Fuentes de variación	GL	SC	CM	FC	p-value	Sig
Tratamientos	2	17,29	8,65	288,167	0,000	**
Error experimental	3	0,09	0,03			
Total	5	17,38				

Nota: GL = grados de libertad; SC = suma de cuadrados; CM = media cuadrática; FC = F calculada; Sig = significancia.

**p < 0,01 = altamente significativo.

Los resultados del análisis de varianza (ANVA) aplicado al parámetro temperatura, permiten observar que la diferencia de medias entre los tratamientos considerados es altamente significativa. Por lo tanto, se acepta la hipótesis de que al menos uno de los efectos de los tratamientos sobre la temperatura es distinto.

Tabla 81

Prueba de comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador temperatura, a la salida de la fase de tratamiento con hipoclorito de calcio

Nº	Tratamientos	\bar{x} (°C)	Sig	Mérito
1	A ₁ B ₂ C ₁ : 0,5 (m ³ /día)/m ² + 14 días de retención + Ca(ClO) ₂	21,85	a	1º
2	A ₂ B ₂ C ₁ : 1 (m ³ /día)/m ² + 14 días de retención + Ca(ClO) ₂	21,95	a	1º
3	A ₀ B ₀ C ₀ : Grupo control	25,50	b	2º

Los resultados de la prueba de Tukey muestran que ambos tratamientos propuestos ($A_1B_2C_1$ y $A_2B_2C_1$) fueron los más efectivos en la reducción del parámetro temperatura para este sistema, con promedios de 21,85 y 21,95 °C, respectivamente; seguidos en segundo y último lugar por el grupo control.

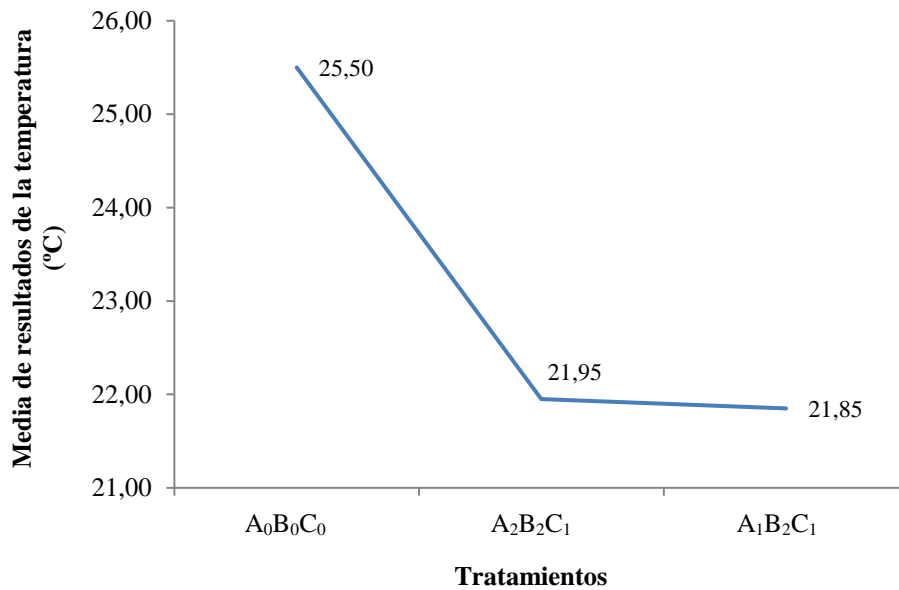


Figura 23. Comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador temperatura, a la salida de la fase de tratamiento con hipoclorito de calcio

Nota: $A_0B_0C_0$ = grupo control; $A_2B_2C_1$ = tratamiento con lombrices a una tasa de riego de $1 \text{ (m}^3/\text{día)}/\text{m}^2$ + 14 días de tratamiento con jacinto de agua + cloración con hipoclorito de calcio; $A_1B_2C_1$ = tratamiento con lombrices a una tasa de riego de $0,5 \text{ (m}^3/\text{día)}/\text{m}^2$ + 14 días de tratamiento con jacinto de agua + cloración con hipoclorito de calcio.

Finalmente, según la figura 23, y reafirmando lo mostrado por la tabla 81, ambos tratamientos propuestos ($A_1B_2C_1$ y $A_2B_2C_1$) son los más efectivos para la reducción del parámetro temperatura, alcanzando sus efluentes valores medios de 21,85 y 21,95 °C, respectivamente.

➤ *Sólidos totales en suspensión (STS)*

Tabla 82

Resultados de los STS a la salida de la fase de tratamiento con hipoclorito de calcio

Tratamientos	Repeticiones	
	r ₁ (mg/L)	r ₂ (mg/L)
A ₁ B ₂ C ₁ : 0,5 (m ³ /día)/m ² + 14 días de retención + Ca(ClO) ₂	7,00	8,20
A ₂ B ₂ C ₁ : 1 (m ³ /día)/m ² + 14 días de retención + Ca(ClO) ₂	6,40	6,10
A ₀ B ₀ C ₀ : Grupo control	99,00	99,00

Fuente: UOLASAT, 2018; LABINVSERV, 2018

En la tabla 82 se pueden apreciar los valores del parámetro STS, obtenidos a la salida de los tratamientos propuestos (A₁B₂C₁ y A₂B₂C₁) y el grupo control (A₀B₀C₀), cada uno con dos repeticiones.

Tabla 83

Comparación de medias de los STS a la salida de la fase de tratamiento con hipoclorito de calcio

Ttos.	N	Media	Error estándar	95 % del intervalo de confianza para la media	
				Límite inferior	Límite superior
A ₁ B ₂ C ₁	2	7,60	0,60	-0,02	15,22
A ₂ B ₂ C ₁	2	6,25	0,15	4,34	8,16
A ₀ B ₀ C ₀	2	99,00	0,00	99,00	99,00
Total	6	37,62	19,41	-12,29	87,52

En la tabla 83 puede observarse que, el contenido medio de STS a la salida de la fase de tratamiento con hipoclorito de calcio, fue de 7,60 mg/L para A₁B₂C₁ y 6,25 mg/L para A₂B₂C₁. Mientras que el grupo control presentó un contenido medio de 99,00 mg/L de STS.

Tabla 84

Análisis de varianza para los STS a la salida de la fase de tratamiento con hipoclorito de calcio

Fuentes de variación	GL	SC	CM	FC	p-value	Sig
Tratamientos	2	11 305,56	5652,78	22 167,771	0,000	**
Error experimental	3	0,77	0,26			
Total	5	11 306,33				

Nota: GL = grados de libertad; SC = suma de cuadrados; CM = media cuadrática; FC = F calculada; Sig = significancia.

**p < 0,01 = altamente significativo.

Los resultados del análisis de varianza (ANVA) para los STS muestran que la diferencia de medias entre los tratamientos considerados es altamente significativa. Por lo que se acepta la hipótesis de que al menos uno de los efectos de los tratamientos sobre los STS es distinto.

Tabla 85

Prueba de comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador STS, a la salida de la fase de tratamiento con hipoclorito de calcio

Nº	Tratamientos	\bar{x} (mg/L)	Sig	Mérito
1	A ₂ B ₂ C ₁ : 1 (m ³ /día)/m ² + 14 días de retención + Ca(ClO) ₂	6,25	a	1º
2	A ₁ B ₂ C ₁ : 0,5 (m ³ /día)/m ² + 14 días de retención + Ca(ClO) ₂	7,60	a	1º
3	A ₀ B ₀ C ₀ : Grupo control	99,00	b	2º

Los resultados de la prueba de Tukey muestran que ambos tratamientos propuestos (A₂B₂C₁ y A₁B₂C₁) fueron los más efectivos en la remoción de STS para este sistema, con promedios de 6,25 y 7,60 mg/L, respectivamente; seguidos en segundo y último lugar por el grupo control.

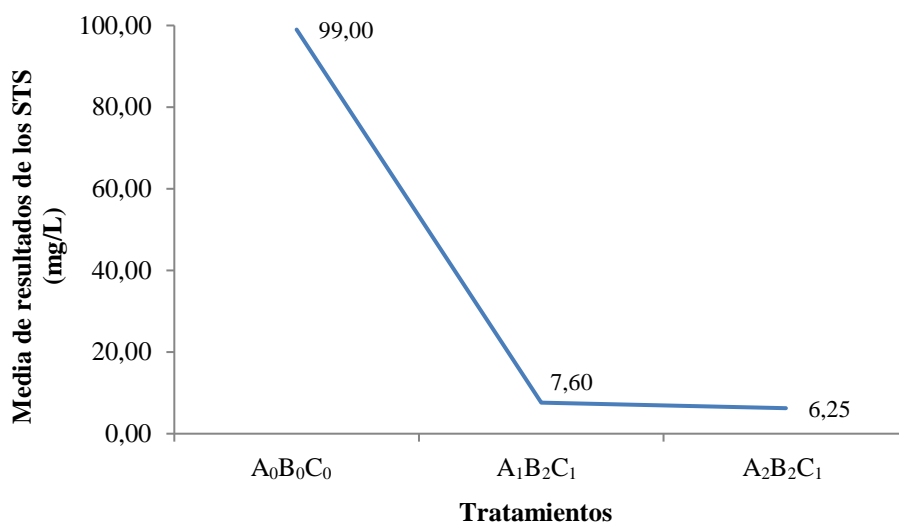


Figura 24. Comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador STS, a la salida de la fase de tratamiento con hipoclorito de calcio

Nota: A₀B₀C₀ = grupo control; A₁B₂C₁ = tratamiento con lombrices a una tasa de riego de 0,5 (m³/día)/m² + 14 días de tratamiento con jacinto de agua + cloración con hipoclorito de calcio; A₂B₂C₁ = tratamiento con lombrices a una tasa de riego de 1 (m³/día)/m² + 14 días de tratamiento con jacinto de agua + cloración con hipoclorito de calcio.

Finalmente, según la figura 24, y de acuerdo a la tabla 85, tanto A₂B₂C₁ como A₁B₂C₁ son los tratamientos más efectivos para la remoción de STS en este sistema, alcanzando sus efluentes una concentración media de 6,25 y 7,60 mg/L, respectivamente.

➤ pH

Tabla 86

Resultados del pH a la salida de la fase de tratamiento con hipoclorito de calcio

Tratamientos	Repeticiones	
	r1 (unidad)	r2 (unidad)
A ₁ B ₂ C ₁ : 0,5 (m ³ /día)/m ² + 14 días de retención + Ca(ClO) ₂	7,87	7,85
A ₂ B ₂ C ₁ : 1 (m ³ /día)/m ² + 14 días de retención + Ca(ClO) ₂	7,75	7,80
A ₀ B ₀ C ₀ : Grupo control	7,38	7,38

Fuente: UOLASAT, 2018; LABINVSERV, 2018

En la tabla 86 se pueden apreciar los valores del parámetro pH, obtenidos a la salida de los tratamientos propuestos ($A_1B_2C_1$ y $A_2B_2C_1$) y el grupo control ($A_0B_0C_0$), cada uno con dos repeticiones.

Tabla 87

Comparación de medias del pH a la salida de la fase de tratamiento con hipoclorito de calcio

Ttos.	N	Media	Error estándar	95 % del intervalo de confianza para la media	
				Límite inferior	Límite superior
$A_1B_2C_1$	2	7,86	0,01	7,73	7,99
$A_2B_2C_1$	2	7,78	0,03	7,46	8,09
$A_0B_0C_0$	2	7,38	0,00	7,38	7,38
Total	6	7,67	0,09	7,43	7,91

Los resultados de la tabla 87 muestran que el pH promedio para $A_1B_2C_1$ fue de 7,86, y de 7,78 para $A_2B_2C_1$. Mientras el pH promedio para el grupo control fue de 7,38 unidades.

Tabla 88

Análisis de varianza para el pH a la salida de la fase de tratamiento con hipoclorito de calcio

Fuentes de variación	GL	SC	CM	FC	p-value	Sig
Tratamientos	2	0,26	0,13	271,483	0,000	**
Error experimental	3	0,00	0,00			
Total	5	0,26				

Nota: GL = grados de libertad; SC = suma de cuadrados; CM = media cuadrática; FC = F calculada; Sig = significancia.

**p < 0,01 = altamente significativo.

Los resultados del análisis de varianza (ANVA) para el parámetro pH permiten ver que la diferencia de medias entre los tratamientos considerados es

altamente significativa. Por lo que se acepta la hipótesis de al menos uno de los efectos de los tratamientos sobre el pH es diferente.

Tabla 89

Prueba de comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador pH, a la salida de la fase de tratamiento con hipoclorito de calcio

Nº	Tratamientos	\bar{x} (unidad)	Sig	Mérito
1	A ₀ B ₀ C ₀ : Grupo control	7,38	a	1º
2	A ₂ B ₂ C ₁ : 1 (m ³ /día)/m ² + 14 días de retención + Ca(ClO) ₂	7,78	b	2º
3	A ₁ B ₂ C ₁ : 0,5 (m ³ /día)/m ² + 14 días de retención + Ca(ClO) ₂	7,86	b	2º

Los resultados de la prueba de Tukey muestran que el tratamiento que presentó valores de pH más cercanos a la neutralidad para este sistema fue el grupo control, con un promedio de 7,38 unidades, seguido en segundo y último lugar por A₂B₂C₁ y A₁B₂C₁, con promedios de 7,78 y 7,86 unidades, respectivamente.

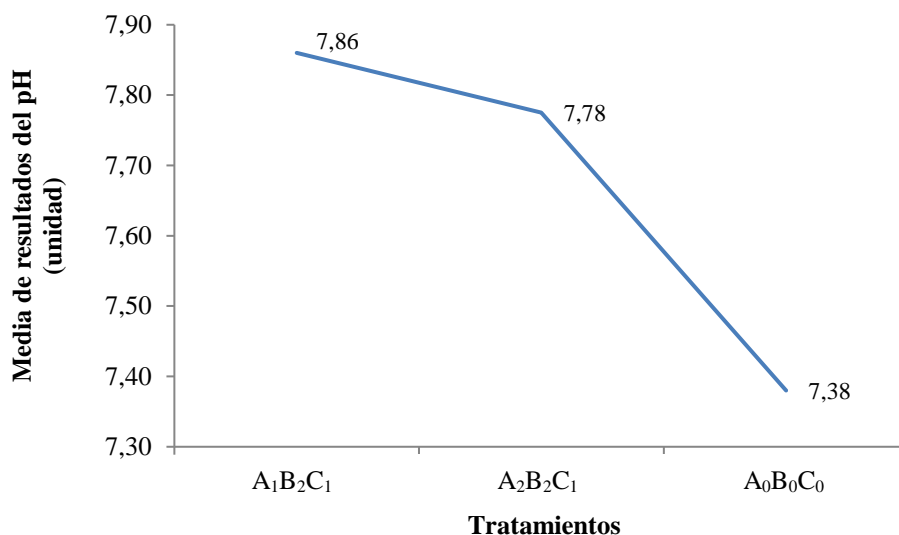


Figura 25. Comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador pH, a la salida de la fase de tratamiento con hipoclorito de calcio

Nota: A₁B₂C₁ = tratamiento con lombrices a una tasa de riego de 0,5 (m³/día)/m² + 14 días de tratamiento con jacinto de agua + cloración con hipoclorito de calcio; A₂B₂C₁ = tratamiento con lombrices a una tasa de riego de 1 (m³/día)/m² + 14 días de tratamiento con jacinto de agua + cloración con hipoclorito de calcio; A₀B₀C₀ = grupo control.

Finalmente, según la figura 25, y de acuerdo a lo expuesto en la tabla 89, el tratamiento que mantuvo valores de pH más cercanos a la neutralidad en este sistema es el grupo control, con una media de 7,38 unidades; mientras que por el contrario, A₂B₂C₁ y A₁B₂C₁ mantuvieron valores más altos de este parámetro.

➤ *Demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅)*

Tabla 90

Resultados de la DBO₅ a la salida de la fase de tratamiento con hipoclorito de calcio

Tratamientos	Repeticiones	
	r ₁ (mg/L)	r ₂ (mg/L)
A ₁ B ₂ C ₁ : 0,5 (m ³ /día)/m ² + 14 días de retención + Ca(ClO) ₂	<2,00	<2,00
A ₂ B ₂ C ₁ : 1 (m ³ /día)/m ² + 14 días de retención + Ca(ClO) ₂	1,70	<2,00
A ₀ B ₀ C ₀ : Grupo control	188,13	188,13

Fuente: UOLASAT, 2018; LABINVSERV, 2018

En la tabla 90 se pueden apreciar los valores del parámetro DBO₅, obtenidos a la salida de los tratamientos propuestos (A₁B₂C₁ y A₂B₂C₁) y el grupo control (A₀B₀C₀), cada uno con dos repeticiones.

Tabla 91

Comparación de medias de la DBO₅ a la salida de la fase de tratamiento con hipoclorito de calcio

Ttos.	N	Media	Error estándar	95 % del intervalo de confianza para la media	
				Límite inferior	Límite superior
A ₁ B ₂ C ₁	2	2,00	0,00	2,00	2,00
A ₂ B ₂ C ₁	2	1,85	0,15	-0,06	3,76
A ₀ B ₀ C ₀	2	188,13	0,00	188,13	188,13
Total	6	63,99	39,26	-36,92	164,90

La tabla 91 muestra que la DBO₅ promedio a la salida de la fase de tratamiento con hipoclorito de calcio fue de 2,00 mg/L para A₁B₂C₁, y de 1,85 mg/L para A₂B₂C₁. Mientras que para el grupo control fue de 188,13 mg/L, en promedio.

Tabla 92

Análisis de varianza para la DBO₅ a la salida de la fase de tratamiento con hipoclorito de calcio

Fuentes de variación	GL	SC	CM	FC	p-value	Sig
Tratamientos	2	46 229,76	23 114,88	1 540 991,95	0,000	**
Error experimental	3	0,05	0,02			
Total	5	46 229,80				

Nota: GL = grados de libertad; SC = suma de cuadrados; CM = media cuadrática; FC = F calculada; Sig = significancia.

**p < 0,01 = altamente significativo.

El análisis de varianza (ANVA) aplicado al parámetro DBO₅ permite observar que la diferencia de medias entre los tratamientos considerados es altamente significativa. De modo que, se acepta la hipótesis de que al menos uno de los efectos de los tratamientos sobre la DBO₅ es diferente.

Tabla 93

Prueba de comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador DBO₅, a la salida de la fase de tratamiento con hipoclorito de calcio

Nº	Tratamientos	\bar{x} (mg/L)	Sig	Mérito
1	A ₂ B ₂ C ₁ : 1 (m ³ /día)/m ² + 14 días de retención + Ca(ClO) ₂	1,85	a	1º
2	A ₁ B ₂ C ₁ : 0,5 (m ³ /día)/m ² + 14 días de retención + Ca(ClO) ₂	2,00	a	1º
3	A ₀ B ₀ C ₀ : Grupo control	188,13	b	2º

Los resultados de la prueba de Tukey muestran que ambos tratamientos propuestos ($A_2B_2C_1$ y $A_1B_2C_1$) fueron los más efectivos en la remoción de la DBO_5 para este sistema, con promedios de 1,85 y 2,00 mg/L, respectivamente; seguidos en segundo y último lugar por el grupo control.

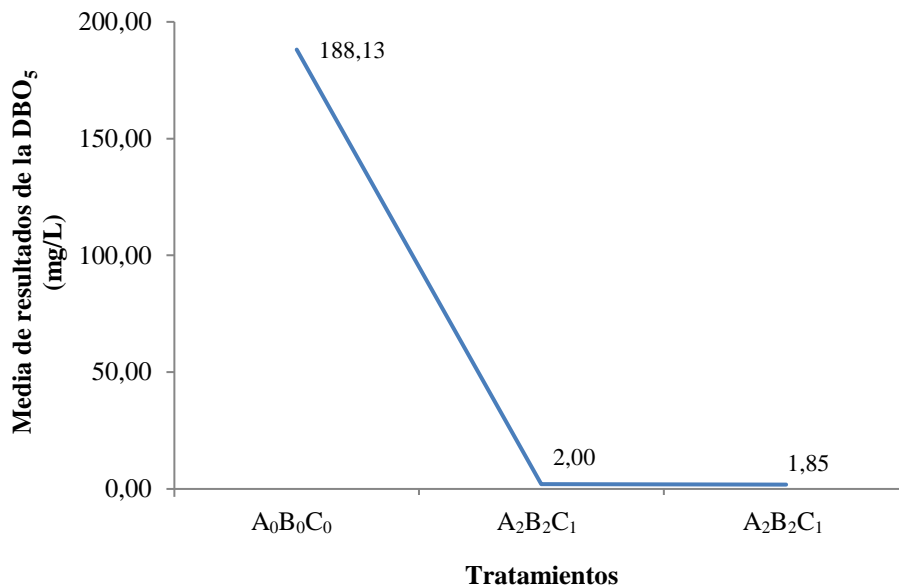


Figura 26. Comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador DBO_5 , a la salida de la fase de tratamiento con hipoclorito de calcio

Nota: $A_0B_0C_0$ = grupo control; $A_1B_2C_1$ = tratamiento con lombrices a una tasa de riego de $0,5 \text{ (m}^3/\text{día)/m}^2$ + 14 días de tratamiento con jacinto de agua + cloración con hipoclorito de calcio; $A_2B_2C_1$ = tratamiento con lombrices a una tasa de riego de $1 \text{ (m}^3/\text{día)/m}^2$ + 14 días de tratamiento con jacinto de agua + cloración con hipoclorito de calcio.

Finalmente, según la figura 26, y de acuerdo a lo observado en la tabla 93, tanto $A_2B_2C_1$ como $A_1B_2C_1$ son los tratamientos más efectivos para la remoción de la DBO_5 en este sistema, alcanzando sus efluentes una concentración media de 2,00 y 1,85 mg/L, respectivamente.

➤ *Coliformes termotolerantes*

Tabla 94

Resultados de las coliformes termotolerantes a la salida de la fase de tratamiento con hipoclorito de calcio

Tratamientos	Repeticiones	
	r1	r2
	(NMP/100 mL)	(NMP/100 mL)
A ₁ B ₂ C ₁ : 0,5 (m ³ /día)/m ² + 14 días de retención + Ca(ClO) ₂	<1,80	<1,80
A ₂ B ₂ C ₁ : 1 (m ³ /día)/m ² + 14 días de retención + Ca(ClO) ₂	<1,80	2,00
A ₀ B ₀ C ₀ : Grupo control	2,40 x 10 ⁷	2,40 x 10 ⁷

Fuente: Laboratorio de salud ambiental de la Subgerencia de Salud Ambiental Moquegua, 2018

En la tabla 94 se pueden apreciar los valores del parámetro coliformes termotolerantes, obtenidos a la salida de los tratamientos propuestos (A₁B₂C₁ y A₂B₂C₁) y el grupo control (A₀B₀C₀), cada uno con dos repeticiones.

Tabla 95

Comparación de medias de las coliformes termotolerantes a la salida de la fase de tratamiento con hipoclorito de calcio

Ttos.	N	Media	Error estándar	95 % del intervalo de confianza para la media	
				Límite inferior	Límite superior
A ₁ B ₂ C ₁	2	1,80	0,00	1,80	1,80
A ₂ B ₂ C ₁	2	1,90	0,10	0,63	3,17
A ₀ B ₀ C ₀	2	2,40 x 10 ⁷	0,00	24 000 000,00	24 000 000,00
Total	16	8 000 001,23	5 059 643,87	-5 006 227,38	21 006 229,85

La tabla 95 muestra que el contenido medio de coliformes termotolerantes a la salida de la fase de tratamiento con hipoclorito de calcio fue de 1,80 para A₁B₂C₁, y de 1,90 NMP/100 mL para A₂B₂C₁. Mientras que, para el grupo control, la media fue 2,40 x 10⁷ NMP/100 mL.

Tabla 96

Análisis de varianza para las coliformes termotolerantes a la salida de la fase de tratamiento con hipoclorito de calcio

Fuentes de variación	GL	SC	CM	FC	p-value	Sig
Tratamientos	2	7,68 x 10 ¹⁴	3,84 x 10 ¹⁴	5,76 x 10 ¹⁶	0,000	**
Error experimental	3	0,02	0,01			
Total	5	7,68 x 10 ¹⁴				

Nota: GL = grados de libertad; SC = suma de cuadrados; CM = media cuadrática; FC = F calculada; Sig = significancia.

**p < 0,01 = altamente significativo.

Los resultados del análisis de varianza (ANVA) para el parámetro coliformes termotolerantes, muestra que la diferencia de medias entre los tratamientos considerados es altamente significativa. De acuerdo con esto, se acepta la hipótesis de que por lo menos el efecto de uno de los tratamientos sobre las coliformes termotolerantes es diferente.

Tabla 97

Prueba de comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador coliformes termotolerantes, a la salida de la fase de tratamiento con hipoclorito de calcio

Nº	Tratamientos	\bar{x} (NMP/100 mL)	Sig	Mérito
1	A ₁ B ₂ C ₁ : 0,5 (m ³ /día)/m ² + 14 días de retención + Ca(ClO) ₂	1,80	a	1º
2	A ₂ B ₂ C ₁ : 1 (m ³ /día)/m ² + 14 días de retención + Ca(ClO) ₂	1,90	a	1º
3	A ₀ B ₀ C ₀ : Grupo control	24 000 000,00	b	2º

Los resultados de la prueba de Tukey muestran que ambos tratamientos propuestos (A₁B₂C₁ y A₂B₂C₁) fueron los más efectivos en la remoción de

coliformes termotolerantes para este sistema, con promedios de 1,80 y 1,90.NMP/100 mL, respectivamente; seguidos en segundo y último lugar por el grupo control.

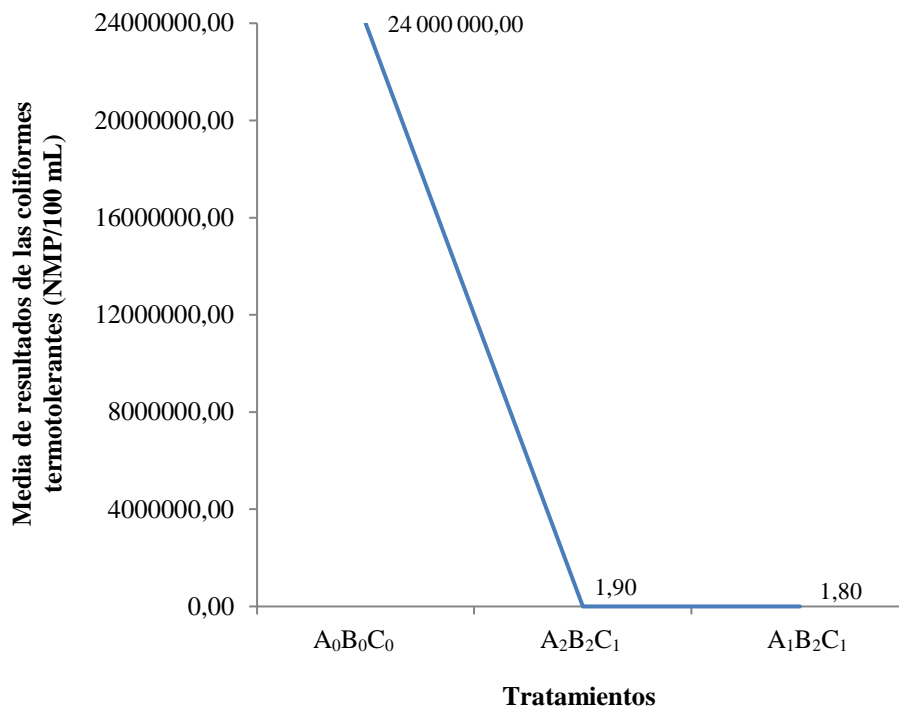


Figura 27. Comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador coliformes termotolerantes, a la salida de la fase de tratamiento con hipoclorito de calcio

Nota: A₀B₀C₀ = grupo control; A₂B₂C₁ = tratamiento con lombrices a una tasa de riego de 1 (m³/día)/m² + 14 días de tratamiento con jacinto de agua + cloración con hipoclorito de calcio; A₁B₂C₁ = tratamiento con lombrices a una tasa de riego de 0,5 (m³/día)/m² + 14 días de tratamiento con jacinto de agua + cloración con hipoclorito de calcio.

Finalmente, según la figura 27, y de acuerdo a lo observado en la tabla 97, tanto A₁B₂C₁ como A₂B₂C₁ son los tratamientos más efectivos para la remoción de coliformes termotolerantes en este sistema, alcanzando sus efluentes una concentración media de 1,80 y 1,90 NMP/100 mL, respectivamente.

4.1.3 Características físicas, químicas y microbiológicas del efluente a la salida de cada sistema de tratamiento

A continuación se presentan los resultados del análisis de los principales parámetros físicos, químicos y microbiológicos del efluente a la salida de cada sistema.

4.1.3.1 Resultados a la salida de cada sistema de tratamiento y análisis estadístico por parámetro de evaluación.

a. Temperatura

Tabla 98

Resultados de la temperatura a la salida de cada sistema de tratamiento

Sistemas	Tratamientos	Repeticiones	Resultados
A: Lombrices	A ₁ : 0,5 (m ³ /día)/m ²	r ₁	25,20
		r ₂	25,30
	A ₂ : 1 (m ³ /día)/m ²	r ₁	23,90
		r ₂	24,30
AB: Lombrices + jacinto de agua	A ₁ B ₁ : 0,5 (m ³ /día)/m ² + 7 días de retención	r ₁	20,60
		r ₂	21,50
	A ₂ B ₁ : 1 (m ³ /día)/m ² + 7 días de retención	r ₁	20,80
		r ₂	21,90
	A ₁ B ₂ : 0,5 (m ³ /día)/m ² + 14 días de retención	r ₁	19,40
		r ₂	19,80
	A ₂ B ₂ : 1 (m ³ /día)/m ² + 14 días de retención	r ₁	19,90
		r ₂	20,10
ABC: Lombrices + jacinto de agua + hipoclorito de calcio	A ₁ B ₂ C ₁ : 0,5 (m ³ /día)/m ² + 14 días de retención + Ca(ClO) ₂	r ₁	21,70
		r ₂	22,00
	A ₂ B ₂ C ₁ : 1 (m ³ /día)/m ² + 14 días de retención + Ca(ClO) ₂	r ₁	21,80
		r ₂	22,10
Sin tratamiento		r ₁	25,50
		r ₂	25,50

En la tabla 98 se pueden apreciar los valores del parámetro temperatura, obtenidos a la salida de cada uno de los sistemas de tratamiento propuestos, así como del afluente sin tratamiento.

Tabla 99

Comparación de medias de la temperatura entre sistemas de tratamiento

Sistemas	N	Media	Error estándar	95 % del intervalo de confianza para la media	
				Límite inferior	Límite superior
A	4	24,68	0,34	23,59	25,76
AB	8	20,50	0,31	19,77	21,23
ABC	4	21,90	0,09	21,61	22,19
Sin tto.	2	25,50	0,00	25,50	25,50
Total	18	22,29	0,50	21,24	23,35

Como se observa en la tabla 99, la temperatura media a la salida del sistema A fue de 24,68 °C, de 20,50 °C a la salida del sistema AB, y de 21,90 °C a la salida de ABC. Por otro lado, la temperatura media para el agua residual sin tratamiento fue de 25,50 °C.

Tabla 100

Análisis de varianza para la temperatura entre sistemas de tratamiento

Fuentes de variación	GL	SC	CM	FC	p-value	Sig
Sistemas	3	69,60	23,20	47,854	0,000	**
Error experimental	14	6,79	0,49			
Total	17	76,39				

Nota: GL = grados de libertad; SC = suma de cuadrados; CM = media cuadrática; FC = F calculada; Sig = significancia.

**p < 0,01 = altamente significativo.

Los resultados obtenidos del análisis de varianza (ANVA) aplicado al parámetro temperatura a la salida de los sistemas de tratamiento, permiten observar que la diferencia de medias de éstos es altamente significativa. Por lo

tanto, se acepta la hipótesis de que al menos uno de los efectos de los sistemas sobre la temperatura es distinto.

Tabla 101

Prueba de comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador temperatura, entre sistemas de tratamiento

N°	Sistemas	\bar{x} (°C)	Sig	Mérito
1	AB: Lombrices + jacinto de agua	20,50	a	1°
2	ABC: Lombrices + jacinto de agua + hipoclorito de calcio	21,90	a	1°
3	A: Lombrices	24,68	b	2°
4	Sin tratamiento	25,50	b	2°

Los resultados de la prueba de Tukey muestran que tanto el sistema AB como el sistema ABC fueron los más efectivos en la reducción del parámetro temperatura, con promedios de 20,50 y 21,90 °C, respectivamente; seguidos en segundo y último lugar por el sistema A y el agua residual sin tratamiento, con promedios de 24,68 y 25,50 °C, respectivamente.

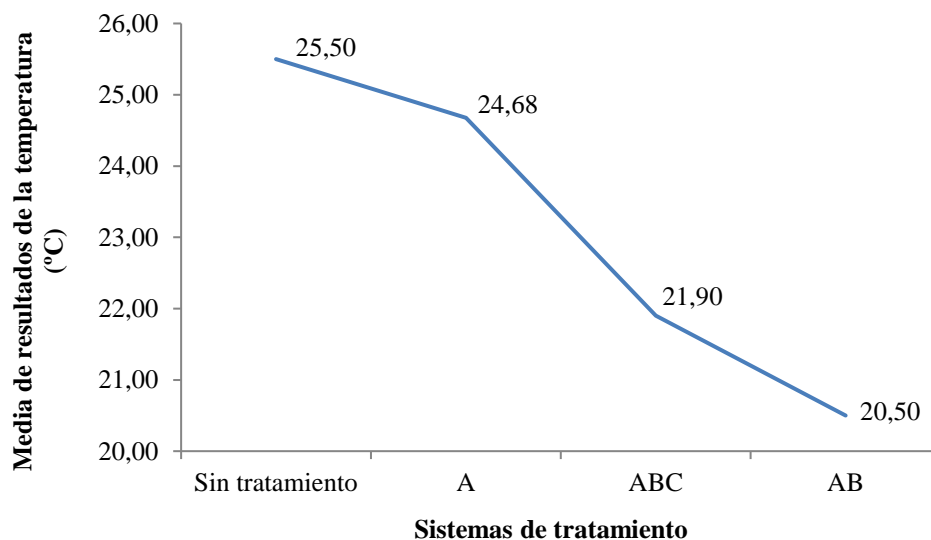


Figura 28. Comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador temperatura, entre sistemas de tratamiento

Nota: A = lombrices; ABC = lombrices + jacinto de agua + hipoclorito de calcio; AB = lombrices + jacinto de agua.

Finalmente, según se observa en la figura 28, y de acuerdo a la tabla 101, los sistemas más efectivos para la reducción del parámetro temperatura son AB y ABC, alcanzándose en sus efluentes valores medios de 20,50 y 21,90 °C, respectivamente.

b. Sólidos totales en suspensión (STS)

Tabla 102

Resultados de los STS a la salida de cada sistema de tratamiento

Sistemas	Tratamientos	Repeticiones	Resultados	
A: Lombrices	A ₁ : 0,5 (m ³ /día)/m ²	r ₁	34,00	
		r ₂	32,00	
	A ₂ : 1 (m ³ /día)/m ²	r ₁	46,00	
		r ₂	42,00	
	AB: Lombrices + jacinto de agua	A ₁ B ₁ : 0,5 (m ³ /día)/m ² + 7 días de retención	r ₁	3,00
			r ₂	2,90
A ₂ B ₁ : 1 (m ³ /día)/m ² + 7 días de retención		r ₁	6,00	
		r ₂	5,70	
A ₁ B ₂ : 0,5 (m ³ /día)/m ² + 14 días de retención		r ₁	7,00	
		r ₂	6,70	
A ₂ B ₂ : 1 (m ³ /día)/m ² + 14 días de retención		r ₁	6,40	
		r ₂	6,00	
ABC: Lombrices + jacinto de agua + hipoclorito de calcio		A ₁ B ₂ C ₁ : 0,5 (m ³ /día)/m ² + 14 días de retención + Ca(ClO) ₂	r ₁	7,00
			r ₂	8,20
		A ₂ B ₂ C ₁ : 1 (m ³ /día)/m ² + 14 días de retención + Ca(ClO) ₂	r ₁	6,40
			r ₂	6,10
Sin tratamiento		r ₁	99,00	
		r ₂	99,00	

Fuente: LABINVSERV, 2018; UOLASAT, 2018

En la tabla 102 se aprecian los valores de los STS obtenidos a la salida de cada uno de los sistemas de tratamiento propuestos, así como del afluente sin tratamiento.

Tabla 103*Comparación de medias de los STS entre sistemas de tratamiento*

Sistemas	N	Media	Error estándar	95 % del intervalo de confianza para la media	
				Límite inferior	Límite superior
A	4	38,50	3,30	27,99	49,01
AB	8	5,46	0,57	4,12	6,80
ABC	4	6,93	0,46	5,45	8,40
Sin tto.	2	99,00	0,00	99,00	99,00
Total	18	23,52	7,27	8,19	38,85

En la tabla 103 puede observarse que el contenido promedio de STS a la salida del sistema de tratamiento A fue de 38,50 mg/L, de 5,46 mg/L a la salida del sistema AB, y de 6,93 mg/L a la salida de ABC. Por otro lado, el contenido medio de STS del agua residual sin tratar fue de 99,00 mg/L.

Tabla 104*Análisis de varianza para los STS entre sistemas de tratamiento*

Fuentes de variación	GL	SC	CM	FC	p-value	Sig
Sistemas	3	16 002,23	5334,08	492,507	0,000	**
Error experimental	14	151,63	10,83			
Total	17	16 153,85				

Nota: GL = grados de libertad; SC = suma de cuadrados; CM = media cuadrática; FC = F calculada; Sig = significancia.

**p < 0,01 = altamente significativo.

Los resultados del análisis de varianza (ANVA) para el parámetro STS a la salida de los sistemas de tratamiento, muestra que la diferencia de medias de éstos es altamente significativa. Por lo cual, se acepta la hipótesis de que al menos uno de los efectos de los sistemas sobre los STS es distinto.

Tabla 105

Prueba de comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador STS, entre sistemas de tratamiento

Nº	Sistemas	\bar{x} (mg/L)	Sig	Mérito
1	AB: Lombrices + jacinto de agua	5,46	a	1º
2	ABC: Lombrices + jacinto de agua + hipoclorito de calcio	6,93	a	1º
3	A: Lombrices	38,50	b	2º
4	Sin tratamiento	99,00	c	3º

Los resultados de la prueba de Tukey muestran que tanto el sistema AB como el sistema ABC fueron los más efectivos en la remoción de STS, con promedios de 5,46 y 6,93 mg/L, respectivamente; seguidos en segundo lugar por el sistema A, con un promedio de 38,50 mg/L, y en tercer y último lugar por el agua residual sin tratamiento, con un promedio de 99,00 mg/L.

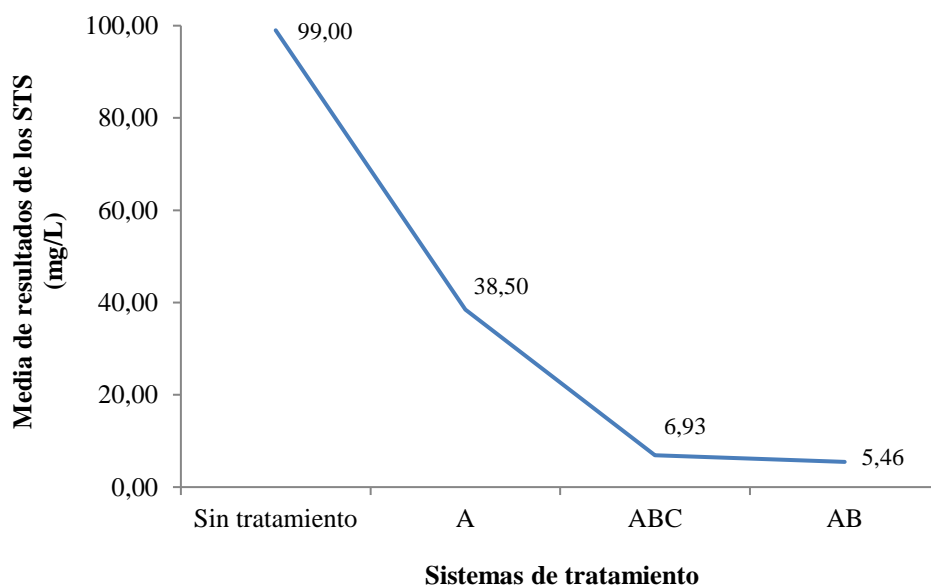


Figura 29. Comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador STS, entre sistemas de tratamiento

Nota: A = lombrices; ABC = lombrices + jacinto de agua + hipoclorito de calcio; AB = lombrices + jacinto de agua.

Finalmente, según se observa en la figura 29, y reafirmando lo mostrado por la tabla 105, los sistemas más efectivos para la remoción de STS son AB y ABC, alcanzando sus efluentes una concentración media de 5,46 y 6,93 mg/L, respectivamente.

c. pH

Tabla 106

Resultados del pH a la salida de cada sistema de tratamiento

Sistemas	Tratamientos	Repeticiones	Resultados
A: Lombrices	A ₁ : 0,5 (m ³ /día)/m ²	r ₁	8,35
		r ₂	8,27
	A ₂ : 1 (m ³ /día)/m ²	r ₁	8,21
		r ₂	8,25
AB: Lombrices + jacinto de agua	A ₁ B ₁ : 0,5 (m ³ /día)/m ² + 7 días de retención	r ₁	7,68
		r ₂	7,75
	A ₂ B ₁ : 1 (m ³ /día)/m ² + 7 días de retención	r ₁	7,48
		r ₂	7,38
	A ₁ B ₂ : 0,5 (m ³ /día)/m ² + 14 días de retención	r ₁	7,54
		r ₂	7,46
	A ₂ B ₂ : 1 (m ³ /día)/m ² + 14 días de retención	r ₁	7,41
		r ₂	7,40
ABC: Lombrices + jacinto de agua + hipoclorito de calcio	A ₁ B ₂ C ₁ : 0,5 (m ³ /día)/m ² + 14 días de retención + Ca(ClO) ₂	r ₁	7,87
		r ₂	7,85
	A ₂ B ₂ C ₁ : 1 (m ³ /día)/m ² + 14 días de retención + Ca(ClO) ₂	r ₁	7,75
		r ₂	7,80
Sin tratamiento	r ₁	7,38	
	r ₂	7,38	

En la tabla 106 se pueden apreciar los valores del parámetro pH, obtenidos a la salida de cada uno de los sistemas de tratamiento propuestos, así como del afluente sin tratamiento.

Tabla 107

Comparación de medias del pH entre sistemas de tratamiento

Sistemas	N	Media	Error estándar	95 % del intervalo de confianza para la media	
				Límite inferior	Límite superior
A	4	8,27	0,03	8,18	8,36
AB	8	7,51	0,05	7,40	7,63
ABC	4	7,82	0,03	7,73	7,90
Sin tto.	2	7,38	0,00	7,38	7,38
Total	18	7,73	0,08	7,56	7,90

Los resultados de la tabla 107 muestran que el pH medio fue de 8,27 a la salida del sistema A, de 7,51 a la salida del sistema AB y de 7,82 unidades a la salida de ABC; mientras que el pH promedio para el agua sin tratar fue de 7,38 unidades.

Tabla 108

Análisis de varianza para el pH entre sistemas de tratamiento

Fuentes de variación	GL	SC	CM	FC	p-value	Sig
Sistemas	3	1,82	0,61	57,076	0,000	**
Error experimental	14	0,15	0,01			
Total	17	1,97				

Nota: GL = grados de libertad; SC = suma de cuadrados; CM = media cuadrática; FC = F calculada; Sig = significancia.

**p < 0,01 = altamente significativo.

Los resultados del análisis de varianza (ANVA) para el parámetro pH a la salida de los sistemas de tratamiento, permite ver que la diferencia de medias entre

los sistemas considerados es altamente significativa. Por lo que se acepta la hipótesis de que al menos uno de los efectos de los sistemas sobre el pH es diferente.

Tabla 109

Prueba de comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador pH, entre sistemas de tratamiento

Nº	Sistemas	\bar{x} (unidad)	Sig	Mérito
1	Sin tratamiento	7,38	a	1º
2	AB: Lombrices + jacinto de agua	7,51	a	1º
3	ABC: Lombrices + jacinto de agua + hipoclorito de calcio	7,82	b	2º
4	A: Lombrices	8,27	c	3º

Los resultados de la prueba de Tukey muestran que tanto el agua residual sin tratamiento como el sistema AB presentaron los valores de pH más cercanos a la neutralidad, con promedios de 7,38 y 7,51 unidades, respectivamente; seguidos en segundo lugar por el sistema ABC con un promedio de 7,82 unidades, y en tercer y último lugar por el sistema A, con una media de 8,27.

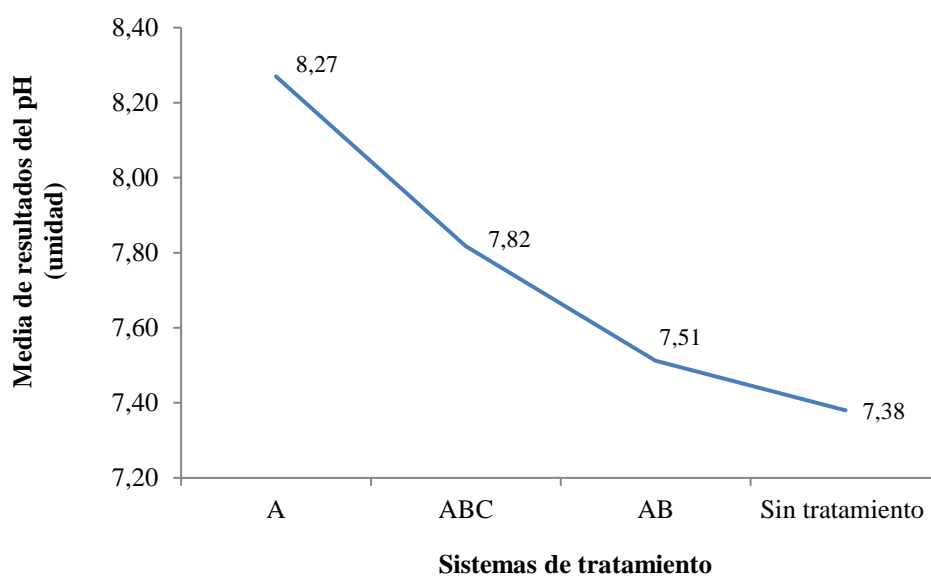


Figura 30. Comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador pH, entre sistemas de tratamiento

Nota: A = lombrices; ABC = lombrices + jacinto de agua + hipoclorito de calcio; AB = lombrices + jacinto de agua.

Finalmente, según la figura 30, y de acuerdo a la tabla 109, el sistema propuesto que mantuvo valores de pH más cercanos a la neutralidad fue el sistema AB, alcanzando un valor medio de 7,51 unidades en sus efluentes, además del agua residual sin tratamiento, con 7,38 unidades.

d. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅)

Tabla 110

Resultados de la DBO₅ a la salida de cada sistema de tratamiento

Sistemas	Tratamientos	Repeticiones	Resultados	
A: Lombrices	A ₁ : 0,5 (m ³ /día)/m ²	r ₁	95,77	
		r ₂	90,98	
	A ₂ : 1 (m ³ /día)/m ²	r ₁	96,64	
		r ₂	91,81	
	AB: Lombrices + jacinto de agua	A ₁ B ₁ : 0,5 (m ³ /día)/m ² + 7 días de retención	r ₁	3,90
			r ₂	3,70
A ₂ B ₁ : 1 (m ³ /día)/m ² + 7 días de retención		r ₁	3,10	
		r ₂	3,30	
A ₁ B ₂ : 0,5 (m ³ /día)/m ² + 14 días de retención		r ₁	3,10	
		r ₂	2,90	
A ₂ B ₂ : 1 (m ³ /día)/m ² + 14 días de retención		r ₁	<2,00	
		r ₂	<2,00	
ABC: Lombrices + jacinto de agua + hipoclorito de calcio	A ₁ B ₂ C ₁ : 0,5 (m ³ /día)/m ² + 14 días de retención + Ca(ClO) ₂	r ₁	<2,00	
		r ₂	<2,00	
	A ₂ B ₂ C ₁ : 1 (m ³ /día)/m ² + 14 días de retención + Ca(ClO) ₂	r ₁	1,70	
		r ₂	<2,00	
Sin tratamiento		r ₁	188,13	
		r ₂	188,13	

Fuente: LABINVSERV, 2018; UOLASAT, 2018

En la tabla 110 se pueden apreciar los valores del parámetro DBO₅, obtenidos a la salida de cada uno de los sistemas de tratamiento propuestos, así como del afluente sin tratamiento.

Tabla 111

Comparación de medias de la DBO₅ entre sistemas de tratamiento

Sistemas	N	Media	Error estándar	95 % del intervalo de confianza para la media	
				Límite inferior	Límite superior
A	4	93,80	1,41	89,31	98,29
AB	8	3,00	0,25	2,42	3,58
ABC	4	1,93	0,08	1,69	2,16
Sin tto.	2	188,13	0,00	188,13	188,13
Total	18	43,51	15,34	11,14	75,88

La tabla 111 muestra que la DBO₅ promedio a la salida del sistema de tratamiento A, fue de 93,80 mg/L, de 3,00 mg/L para el sistema AB y de 1,93 mg/L para ABC, mientras que para el agua sin tratar fue de 188,13 mg/L, en promedio.

Tabla 112

Análisis de varianza para la DBO₅ entre sistemas de tratamiento

Fuentes de variación	GL	SC	CM	FC	p-value	Sig
Sistemas	3	71 991,96	23 997,32	12 285,391	0,000	**
Error experimental	14	27,35	1,95			
Total	17	72 019,30				

Nota: GL = grados de libertad; SC = suma de cuadrados; CM = media cuadrática; FC = F calculada; Sig = significancia.

**p < 0,01 = altamente significativo.

El análisis de varianza (ANVA) aplicado al parámetro DBO₅ a la salida de los sistemas de tratamiento, permite observar que la diferencia de medias entre los sistemas considerados es altamente significativa. De modo que se acepta la hipótesis de que al menos uno de los efectos de los sistemas sobre la DBO₅ es diferente.

Tabla 113

Prueba de comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador DBO₅, entre sistemas de tratamiento

Nº	Sistemas	\bar{x} (mg/L)	Sig	Mérito
1	ABC: Lombrices + jacinto de agua + hipoclorito de calcio	1,93	a	1º
2	AB: Lombrices + jacinto de agua	3,00	a	1º
3	A: Lombrices	93,80	b	2º
4	Sin tratamiento	188,13	c	3º

Los resultados de la prueba de Tukey muestran que tanto el sistema ABC como el sistema AB fueron los más efectivos en la remoción de la DBO₅, con promedios de 1,93 y 3,00 mg/L, respectivamente; seguidos en segundo lugar por el sistema A, con un promedio de 93,80 mg/L, y en tercer y último lugar por el agua residual sin tratamiento, con un promedio 188,13 mg/L.

Finalmente, según se observa en la figura 31, y reafirmando lo mostrado por la tabla 113, los sistemas más efectivos para la remoción de la DBO₅ son ABC y AB, alcanzando sus efluentes una concentración media de 1,93 y 3,00 mg/L, respectivamente.

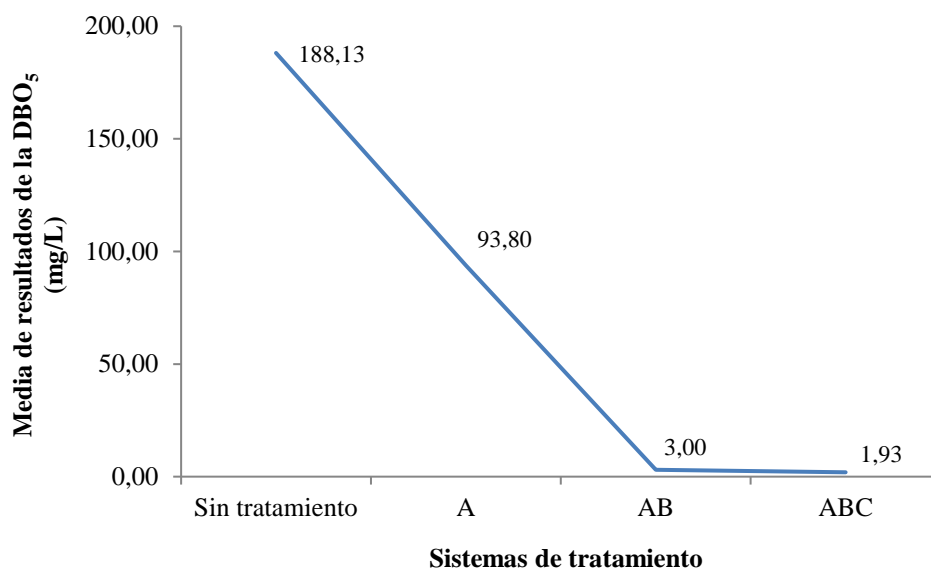


Figura 31. Comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador DBO₅, entre sistemas de tratamiento

Nota: A = lombrices; AB = lombrices + jacinto de agua; ABC = lombrices + jacinto de agua + hipoclorito de calcio.

e. Coliformes termotolerantes

Tabla 114

Resultados de las coliformes termotolerantes a la salida de cada sistema de tratamiento

Sistemas	Tratamientos	Repeticiones	Resultados
A: Tratamiento con lombrices	A ₁ : A ₁ : 0,5 (m ³ /día)/m ²	r ₁	110 000,00
		r ₂	100 000,00
	A ₂ : A ₂ : 1 (m ³ /día)/m ²	r ₁	35 000,00
		r ₂	33 000,00
AB: Tratamiento con lombrices + jacinto de agua	A ₁ B ₁ : A ₁ B ₁ : 0,5 (m ³ /día)/m ² + 7 días de retención	r ₁	130,00
		r ₂	120,00
	A ₂ B ₁ : A ₂ B ₁ : 1 (m ³ /día)/m ² + 7 días de retención	r ₁	22,00
		r ₂	20,00
	A ₁ B ₂ : A ₁ B ₂ : 0,5 (m ³ /día)/m ² + 14 días de retención	r ₁	<1,80
		r ₂	<1,80
	A ₂ B ₂ : A ₂ B ₂ : 1 (m ³ /día)/m ² + 14 días de retención	r ₁	2,00
		r ₂	<1,80

Tabla 114*Resultados de las coliformes termotolerantes a la salida de cada sistema de tratamiento (continuación)*

Sistemas	Tratamientos	Repeticiones	Resultados
ABC: Tratamiento con lombrices + jacinto de agua + hipoclorito de calcio	A ₁ B ₂ C ₁ : 0,5 (m ³ /día)/m ² + 14 días de retención + Ca(ClO) ₂	r ₁	<1,80
		r ₂	<1,80
	A ₂ B ₂ C ₁ : 1 (m ³ /día)/m ² + 14 días de retención + Ca(ClO) ₂	r ₁	<1,80
		r ₂	2,00
Sin tratamiento		r ₁	24 000 000,00
		r ₂	24 000 000,00

Fuente: Laboratorio de salud ambiental de la Subgerencia de Salud Ambiental Moquegua, 2018

En la tabla 114 se pueden apreciar los valores del parámetro coliformes termotolerantes, obtenidos a la salida de cada uno de los sistemas de tratamiento propuestos, así como del afluente sin tratamiento.

Tabla 115*Comparación de medias de las coliformes termotolerantes entre sistemas de tratamiento*

Sistemas	N	Media	Error estándar	95 % del intervalo de confianza para la media	
				Límite inferior	Límite superior
A	4	69 500,00	20 601,38	3937,23	135 062,77
AB	8	37,43	19,36	-8,36	83,21
ABC	4	1,85	0,05	1,69	2,01
Sin tt.	2	2,40 x 10 ⁷	0,00	24 000 000,00	24 000 000,00
Total	18	2 682 128,16	1 828 008,56	-1 174 616,97	6 538 904,90

Los resultados de la tabla 115 muestran que el contenido promedio de coliformes termotolerantes a la salida del sistema A fue de $6,95 \times 10^4$ NMP/100 mL, de 37,43 NMP/100 mL a la salida del sistema AB, y de 1,85 NMP/100 mL a la salida de ABC; mientras que para el agua sin tratar la media fue de $2,40 \times 10^7$ NMP/100 mL.

Tabla 116*Análisis de varianza para las coliformes termotolerantes entre sistemas de tratamiento*

Fuentes de variación	GL	SC	CM	FC	p-value	Sig
Sistemas	2	1,02 x 10 ¹⁵	3,41 x 10 ¹⁴	936 931,15	0,000	**
Error experimental	3	5,09 x 10 ⁹	3,64 x 10 ⁸			
Total	5	1,02 x 10 ¹⁵				

Nota: GL = grados de libertad; SC = suma de cuadrados; CM = media cuadrática; FC = F calculada; Sig = significancia.

**p < 0,01 = altamente significativo.

Los resultados del análisis de varianza (ANVA) para el parámetro coliformes termotolerantes a la salida de los sistemas de tratamiento, muestra que la diferencia de medias entre éstos es altamente significativa. De acuerdo con esto, se acepta la hipótesis de que por lo menos el efecto de uno de los sistemas sobre las coliformes termotolerantes es diferente.

Tabla 117

Prueba de comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador coliformes termotolerantes, entre sistemas de tratamiento

Nº	Sistemas	\bar{x} (NMP/100 mL)	Sig	Mérito
1	ABC: Lombrices + jacinto de agua + hipoclorito de calcio	1,85	a	1º
2	AB: Lombrices + jacinto de agua	37,43	a	1º
3	A: Lombrices	69 500,00	b	2º
4	Sin tratamiento	24 000 000,00	c	3º

Los resultados de la prueba de Tukey muestran que tanto el sistema ABC como el sistema AB fueron los más efectivos en la remoción de coliformes termotolerantes, con promedios de 1,85 y 37,43 NMP/100 mL; seguidos en segundo

lugar por el sistema A, con un promedio de 69 500,00 NMP/100 mL, y en tercer y último lugar por el agua residual sin tratamiento, con $2,40 \times 10^7$ NMP/100 mL.

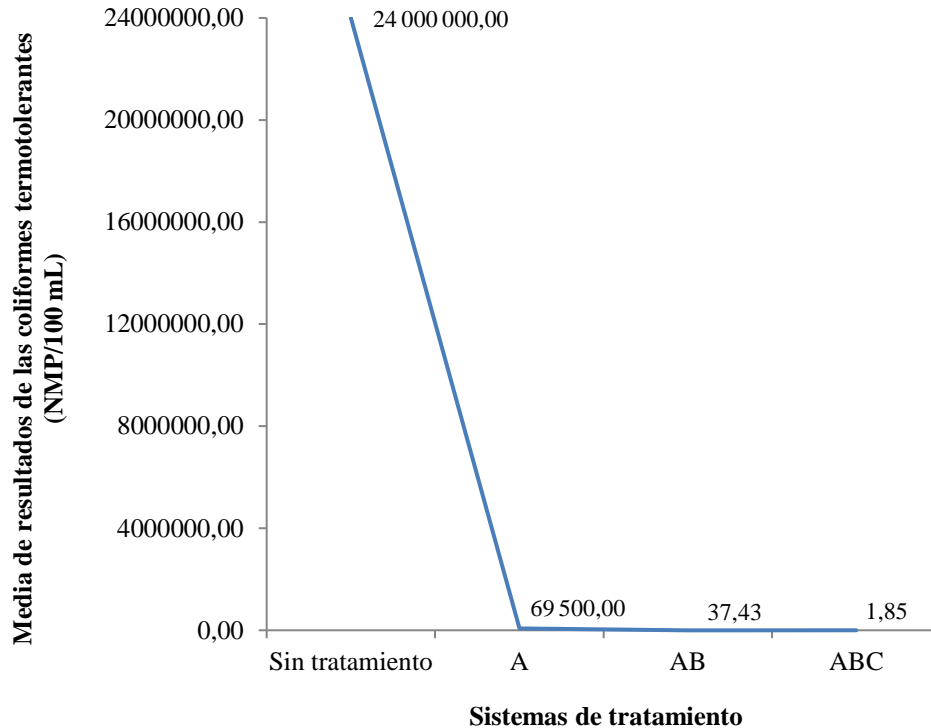


Figura 32. Comparación de medias de Tukey (0,05) del indicador coliformes termotolerantes, entre sistemas de tratamiento

Nota: A = lombrices; ABC = lombrices + jacinto de agua + hipoclorito de calcio; AB = lombrices + jacinto de agua.

Finalmente, según se observa en la figura 32, y reafirmando lo mostrado por la tabla 117, los sistemas más efectivos para la remoción de coliformes termotolerantes son ABC y AB, alcanzando sus efluentes una concentración media de 1,85 y 37,43 NMP/100 mL, respectivamente.

4.1.3.2 Grado de reducción de cada parámetro de evaluación por sistema de tratamiento.

a. Temperatura

En la tabla 118 se muestra el grado de reducción de la temperatura a la salida de cada sistema de tratamiento, respecto al afluente.

Tabla 118*Grado de reducción de la temperatura a la salida de cada sistema de tratamiento*

Sistemas	Tratamientos	\bar{x} (°C)	Reducción media^a (°C)	
A: Lombrices	A ₁ : 0,5 (m ³ /día)/m ²	25,25	0,25	0,82
	A ₂ : 1 (m ³ /día)/m ²	24,10	1,40	
AB: Lombrices + jacinto de agua	A ₁ B ₁ : 0,5 (m ³ /día)/m ² + 7 días de retención	21,05	4,45	5,00
	A ₂ B ₁ : 1 (m ³ /día)/m ² + 7 días de retención	21,35	4,15	
	A ₁ B ₂ : 0,5 (m ³ /día)/m ² + 14 días de retención	19,60	5,90	
ABC: Lombrices + jacinto de agua + hipoclorito de calcio	A ₁ B ₂ C ₁ : 0,5 (m ³ /día)/m ² + 14 días de retención + Ca(ClO) ₂	21,85	3,65	3,60
	A ₂ B ₂ C ₁ : 1 (m ³ /día)/m ² + 14 días de retención + Ca(ClO) ₂	21,95	3,55	
	Sin tratamiento	25,50	0,00	0,00

^aReducción media respecto al afluente.

Los efluentes de los sistemas AB y ABC, considerados como los más efectivos en la reducción del parámetro temperatura, presentaron un descenso medio de 5,00 y 3,60 °C, respectivamente. Dentro de éstos, fue el tratamiento A₁B₂ el que experimentó la mayor reducción, con una disminución de 5,90 °C.

b. Sólidos totales en suspensión (STS)

En la tabla 119 se muestra el porcentaje de remoción de STS a la salida de cada sistema de tratamiento, respecto al afluente.

Los efluentes de los sistemas AB y ABC, considerados como los más efectivos en la remoción de STS, presentaron una reducción media de 94,48 y

93,01 %, respectivamente. Dentro de éstos, fue el tratamiento A₁B₁ el que experimentó el mayor porcentaje de remoción, con 97,02 %.

Tabla 119

Porcentaje de remoción de STS a la salida de cada sistema de tratamiento

Sistemas	Tratamientos	\bar{x} (mg/L)	Remoción media ^a (%)	
A: Lombrices	A ₁ : 0,5 (m ³ /día)/m ²	33,00	66,67	61,11
	A ₂ : 1 (m ³ /día)/m ²	44,00	55,56	
AB: Lombrices + jacinto de agua	A ₁ B ₁ : 0,5 (m ³ /día)/m ² + 7 días de retención	2,95	97,02	94,48
	A ₂ B ₁ : 1 (m ³ /día)/m ² + 7 días de retención	5,85	94,09	
	A ₁ B ₂ : 0,5 (m ³ /día)/m ² + 14 días de retención	6,85	93,08	
	A ₂ B ₂ : 1 (m ³ /día)/m ² + 14 días de retención	6,20	93,74	
ABC: Lombrices + jacinto de agua + hipoclorito de calcio	A ₁ B ₂ C ₁ : 0,5 (m ³ /día)/m ² + 14 días de retención + Ca(ClO) ₂	7,60	92,32	93,01
	A ₂ B ₂ C ₁ : 1 (m ³ /día)/m ² + 14 días de retención + Ca(ClO) ₂	6,25	93,69	
	Sin tratamiento	99,00	0,00	0,00

^aRemoción media respecto al afluente.

Fuente: Adaptado de LABINVSERV, 2018; UOLASAT, 2018

c. pH

En la tabla 120 se muestra el incremento del parámetro pH a la salida de cada sistema de tratamiento, respecto al afluente.

Los efluentes del sistema AB, el cual fue el sistema propuesto que presentó valores de pH más cercanos a la neutralidad, experimentó un incremento medio de 0,13 unidades respecto al afluente. Dentro de éste, el tratamiento A₂B₂ fue el que tuvo el incremento más bajo, el cual fue de solo 0,03 unidades.

Tabla 120*Incremento del pH a la salida de cada sistema de tratamiento*

Sistemas	Tratamientos	\bar{x} (unidad)	Incremento medio ^a (unidad)
A: Lombrices	A ₁ : 0,5 (m ³ /día)/m ²	8,31	0,93
	A ₂ : 1 (m ³ /día)/m ²	8,23	0,85
AB: Lombrices + jacinto de agua	A ₁ B ₁ : 0,5 (m ³ /día)/m ² + 7 días de retención	7,72	0,34
	A ₂ B ₁ : 1 (m ³ /día)/m ² + 7 días de retención	7,43	0,05
	A ₁ B ₂ : 0,5 (m ³ /día)/m ² + 14 días de retención	7,50	0,12
	A ₂ B ₂ : 1 (m ³ /día)/m ² + 14 días de retención	7,41	0,03
ABC: Lombrices + jacinto de agua	A ₁ B ₂ C ₁ : 0,5 (m ³ /día)/m ² + 14 días de retención + Ca(ClO) ₂	7,86	0,48
			0,44
+ hipoclorito de calcio	A ₂ B ₂ C ₁ : 1 (m ³ /día)/m ² + 14 días de retención + Ca(ClO) ₂	7,78	0,40
Sin tratamiento		7,38	0,00

^aIncremento medio respecto al afluente.*d. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅)*

En la tabla 121 se muestra el porcentaje de remoción de DBO₅ a la salida de cada sistema de tratamiento, respecto al afluente.

Tabla 121*Porcentaje de remoción de la DBO₅ a la salida de cada sistema de tratamiento*

Sistemas	Tratamientos	\bar{x} (mg/L)	Remoción media ^a (%)
A: Lombrices	A ₁ : 0,5 (m ³ /día)/m ²	93,38	50,36
	A ₂ : 1 (m ³ /día)/m ²	94,23	49,91
AB: Lombrices + jacinto de agua	A ₁ B ₁ : 0,5 (m ³ /día)/m ² + 7 días de retención	3,80	97,98
	A ₂ B ₁ : 1 (m ³ /día)/m ² + 7 días de retención	3,20	98,30
	A ₁ B ₂ : 0,5 (m ³ /día)/m ² + 14 días de retención	3,00	98,41
	A ₂ B ₂ : 1 (m ³ /día)/m ² + 14 días de retención	2,00	98,94

Tabla 121*Porcentaje de remoción de la DBO₅ a la salida de cada sistema de tratamiento (continuación)*

Sistemas	Tratamientos	\bar{x} (mg/L)	Remoción media^a (%)	
ABC: Lombrices	A ₁ B ₂ C ₁ : 0,5 (m ³ /día)/m ² + 14 días de	2,00	98,94	
+ jacinto de agua	retención + Ca(ClO) ₂			98,98
+ hipoclorito de	A ₂ B ₂ C ₁ : 1 (m ³ /día)/m ² + 14 días de	1,85	99,02	
calcio	retención + Ca(ClO) ₂			
Sin tratamiento		188,13	0,00	0,00

^aRemoción media respecto al afluente.

Fuente: Adaptado de LABINVSERV, 2018; UOLASAT, 2018

Los efluentes de los sistemas ABC y AB, considerados como los más efectivos en la remoción de la DBO₅, experimentaron una reducción media de 98,98 y 98,41 %, respectivamente. Dentro de éstos, fue el tratamiento A₂B₂C₁ el que experimentó el mayor porcentaje de remoción, con 99,02 %.

e. Coliformes termotolerantes

En la tabla 122 se muestra el porcentaje de remoción de coliformes termotolerantes a la salida de cada sistema de tratamiento, respecto al afluente.

Tabla 122*Porcentaje de remoción de coliformes termotolerantes a la salida de cada sistema de tratamiento*

Sistemas	Tratamientos	\bar{x} (NMP/100 mL)	Remoción media^a (%)	
A: Lombrices	A ₁ : 0,5 (m ³ /día)/m ²	105 000,00	99,56	
	A ₂ : 1 (m ³ /día)/m ²	34 000,00	99,86	99,71
AB: Lombrices +	A ₁ B ₁ : 0,5 (m ³ /día)/m ² + 7 días de retención	125,00	100,00	
jacinto de agua	A ₂ B ₁ : 1 (m ³ /día)/m ² + 7 días de retención	21,00	100,00	100,00
	A ₁ B ₂ : 0,5 (m ³ /día)/m ² + 14 días de retención	1,80	100,00	
	A ₂ B ₂ : 1 (m ³ /día)/m ² + 14 días de retención	1,90	100,00	

Tabla 122

Porcentaje de remoción de coliformes termotolerantes a la salida de cada sistema de tratamiento (continuación)

Sistemas	Tratamientos	\bar{x} (NMP/100 mL)	Remoción media^a (%)	
ABC: Lombrices	A ₁ B ₂ C ₁ : 0,5 (m ³ /día)/m ² + 14 días de	1,80	100,00	
+ jacinto de agua	retención + Ca(ClO) ₂			100,00
+ hipoclorito de calcio	A ₂ B ₂ C ₁ : 1 (m ³ /día)/m ² + 14 días de retención + Ca(ClO) ₂	1,90	100,00	
Sin tratamiento		24 000 000,00	0,00	0,00

^aRemoción media respecto al afluente.

Fuente: Laboratorio de salud ambiental de la Subgerencia de Salud Ambiental Moquegua, 2018

Los efluentes de los sistemas ABC y AB, considerados como los más efectivos en la remoción de coliformes termotolerantes, experimentaron ambos una reducción media del 100,00 %, siendo la presencia de estos microorganismos casi inexistente desde el sistema de tratamiento con lombrices + jacinto de agua.

4.2 Contrastación de hipótesis

4.2.1 Hipótesis general

Después de haber efectuado el experimento y habiendo obtenido los resultados de la evaluación de los tres sistemas de tratamiento propuestos, se pudo determinar su eficiencia en el tratamiento de aguas residuales domésticas.

4.2.2 Hipótesis específicas

Las características físicas, químicas y microbiológicas del afluente permitieron conocer el estado inicial del agua residual.

Fue posible aplicar los sistemas propuestos para el tratamiento de aguas residuales domésticas.

El análisis de las características físicas, químicas y microbiológicas del efluente permitió determinar la eficiencia de cada uno de los sistemas de tratamiento.

4.3 Discusión de resultados

La presente investigación tuvo como objetivo evaluar tres sistemas de depuración, para determinar su eficiencia en el tratamiento de aguas residuales domésticas.

Los resultados obtenidos de la caracterización física, química y microbiológica del afluente demostraron que éste presentaba las concentraciones y valores típicos de las aguas residuales domésticas. Así, dentro de los parámetros físicos, presentó una temperatura de 25,50 °C, la cual se encuentra dentro del rango óptimo para el desarrollo de la actividad bacteriana, según Metcalf & Eddy (1995). Asimismo, presentó una concentración débil de sólidos totales en suspensión de 99,00 mg/L (Metcalf & Eddy, 2003, citado por Déniz, 2010).

Por otra parte, dentro de los parámetros químicos, presentó un pH prácticamente neutro de 7,38 y una concentración media de DBO₅ de 188,13 mg/L (Metcalf & Eddy, 2003, citado por Déniz, 2010). Y, en cuanto al parámetro microbiológico, se obtuvo una concentración de $2,40 \times 10^7$ NMP/100 mL de coliformes termotolerantes, la cual también se encuentra dentro de las concentraciones típicas del agua residual bruta (Metcalf & Eddy, 2003, citado por Déniz, 2010).

En el primer sistema, a través del cual el agua residual pasó de forma paralela a través de dos tratamientos: A₁: 0,5 (m³/día)/m² y A₂: 1 (m³/día)/m², con lombrices de la especie *Eisenia foetida* –previo proceso de pre-sedimentación–, los indicadores de la variable dependiente considerados, tales como sólidos totales

en suspensión mostraron un mejor comportamiento para A₁, mientras la temperatura y coliformes termotolerantes mostraron mejores resultados para A₂. Por otro lado, los valores obtenidos de DBO₅ y pH no mostraron diferencia estadística entre tratamientos.

Iniciando con la temperatura, ésta tuvo un descenso desde 25,50 °C en el afluente, hasta una media de 25,25 °C en A₁ y 24,10 °C en A₂. Al respecto de otros autores, ni Ramón *et al.* (2015), ni Coronel (2015) consideraron claramente los efectos del tratamiento con la lombriz sobre este parámetro en sus investigaciones. Metcalf & Eddy (1995), por otro lado, indican que “la temperatura óptima para el desarrollo de la actividad bacteriana se sitúa entre los 25 y los 35 °C” (p. 51), lo cual fue reafirmado por Crites y Tchobanoglous (2000), citados por Delgadillo *et al.* (2010). Por lo tanto, en base a esta relación, consideramos a A₁ como el tratamiento que tuvo mejores resultados para este parámetro en el presente caso, debido a que presentó valores más alejados del rango de temperaturas reconocidas como ideales para la actividad bacteriana.

Por otro lado, los sólidos totales en suspensión fueron removidos hasta una media de 33,00 mg/L (66,67 % de remoción) en A₁ y 44,00 mg/L (55,56 % de remoción) en A₂, existiendo diferencias estadísticas entre sí y considerándose a A₁ como el tratamiento que obtuvo mejores resultados en este caso. Sin embargo, esta remoción fue menor a la mostrada en la investigación de Ramón *et al.* (2015), cuyo efluente presentó propiedades libres de sólidos suspendidos apreciables (<20 mg/l); empero, cabe destacar que en aquel estudio, este porcentaje de reducción fue observado a más de 33 días después del arranque del lombrifiltro, y trabajándose con un lecho adicional de antracita, en lugar de arena gruesa.

El pH del afluente experimentó un incremento de 0,93 y 0,85 unidades en A₁ y en A₂, respectivamente. Estos resultados guardan relación con lo que sostiene Coronel (2015), quien también obtuvo un incremento del pH en su efluente a los 7 días, en este caso de 0,06 unidades. Esta situación podría estar relacionada a la actividad de las glándulas calcíferas o glándulas de Morren de las lombrices, las cuales son órganos especiales encargados de controlar el pH de las sustancias que pasan por su esófago, elevándolo hasta niveles adecuados para su digestión, a través de la segregación y descarga de carbonato cálcico al alimento (Somarriba y Guzmán, 2004).

La DBO₅ fue removida hasta alcanzar una media de 93,38 mg/L (50,36 % de remoción) en A₁ y 94,23 mg/L (49,91 % de remoción) en A₂; no existiendo diferencia estadística entre tratamientos. Sin embargo, ambos niveles de remoción fueron menores a los observados por Coronel (2015) quien consiguió un porcentaje de reducción promedio del 84,38 % de la DBO₅ de su afluente en la primera semana de experimentación, el cual tuvo un valor inicial de 448 mg/L.

Así mismo, se experimentó una reducción importante de coliformes termotolerantes, de 99,56 % en A₁ y 99,86 % en A₂, alcanzando medias de $1,05 \times 10^5$ y de $3,40 \times 10^4$ NMP/100 mL, respectivamente; existiendo diferencias estadísticas entre sí y considerándose a A₂ como el tratamiento que obtuvo mejores resultados para este parámetro. Al respecto, ni Ramón *et al.* (2015), ni Coronel (2015) consideraron los efectos del tratamiento con la lombriz sobre este parámetro en sus investigaciones; sin embargo, otros autores, como Vicente (2014), obtuvieron resultados similares, notándose en este caso la disminución del mencionado parámetro en un 98,90 %.

En el segundo sistema, los efluentes del tratamiento con lombrices pasaron de forma paralela a través de dos tratamientos con jacinto de agua en función del tiempo de retención; realizándose una evaluación a la primera semana de tratamiento: A₁B₁: 0,5 (m³/día)/m² + 7 días de retención, y A₂B₁: 1 (m³/día)/m² + 7 días de retención; y otra a la segunda semana: A₁B₁: 0,5 (m³/día)/m² + 14 días de retención, y A₂B₁: 1 (m³/día)/m² + 14 días de retención.

Los indicadores de la variable dependiente, a los 7 días de retención, tales como pH, DBO₅ y coliformes termotolerantes mostraron un mejor comportamiento para A₂B₁, mientras que sólidos totales en suspensión mostró mejores resultados para A₁B₁. Por otra parte, los valores obtenidos para la temperatura no mostraron diferencia estadística entre tratamientos. A continuación se hace el análisis de cada indicador para el tratamiento con jacinto de agua a los 7 días de retención.

La temperatura, tuvo un descenso desde los 25,50 °C en el afluente, hasta una media de 21,05 °C en A₁B₁ y 21,35 °C en A₂B₁. Al respecto, García (2012) indica que este descenso se debería a la sombra que proveen las hojas gruesas y anchas del jacinto de agua en la superficie del agua, pudiendo disminuir hasta en 3,90 °C la temperatura del agua; lo cual es corroborado en esta investigación con una disminución de hasta 4,45 °C. Sin embargo, según los estudios realizados por Valderrama *et al.* (2003) los valores de la temperatura pueden variar a lo largo del día.

Por otro lado, los sólidos totales en suspensión fueron removidos hasta una media de 2,95 mg/L (97,02 % de remoción) en A₁B₁ y 5,85 mg/L (94,09 % de remoción) en A₂B₁, existiendo diferencias estadísticas entre sí y considerándose a A₁B₁ como el tratamiento que obtuvo mejores resultados en este caso. En relación

a este parámetro, ni Valderrama *et al.* (2003) ni García (2012) consideraron los efectos del tratamiento con jacinto de agua sobre éste en sus investigaciones; no obstante, otros autores, como Coronel (2016), obtuvieron resultados similares, siendo en este caso la disminución de STS de 95,79 %, empleándose solo jacinto de agua. Es válido acotar que estos porcentajes de remoción superan el rango de valores registrados de 21 y 91 %, según Martelo y Lara (2012). Su alta eficiencia en la remoción de sólidos suspendidos se debería a que sus raíces actúan como un medio de filtración/adsorción excelente (Martelo y Lara, 2012).

En relación a los parámetros químicos, el pH experimentó un incremento con relación del afluente (7,38) y una disminución con relación a los efluentes del sistema de tratamiento anterior (con lombrices), alcanzando medias de 7,72 en A₁B₁ y 7,43 en A₂B₁. Al respecto, Valderrama *et al.* (2003) y García (2012) obtuvieron valores más bajos y próximos a la neutralidad con 7,36 y 7,11, respectivamente, a los 6 días de retención. Lo cual se debería a que las macrófitas limitan la actividad fotosintética de las microalgas, al restringir el paso de la luz, impidiendo que disminuyan las concentraciones de anhídrido carbónico (CO₂) disueltos en el agua (Valderrama, 1996).

La DBO₅ fue removida hasta alcanzar una media de 3,80 mg/L (97,98 % de remoción) en A₁B₁ y 3,20 mg/L (98,30 % de remoción) en A₂B₁; existiendo diferencia estadística entre tratamientos y considerándose a A₂B₁ como el tratamiento que obtuvo mejores resultados en este caso. Al respecto de otros autores, García (2012) obtuvo menores valores de remoción (26,70 %); empero, su periodo de retención fue únicamente de 2,5 días, utilizando solo jacinto de agua. Por otro lado, Coronel (2016) obtuvo resultados próximos a los de esta investigación, con el 95,55 % de remoción de este parámetro.

Por otro lado, los resultados obtenidos mostraron que se experimentó una reducción significativa de coliformes termotolerantes alcanzando el 100,00 % de remoción tanto en A₁B₁ como en A₂B₁, con medias de $1,25 \times 10^2$ y de $2,10 \times 10$ NMP/100 mL, respectivamente; existiendo diferencias estadísticas entre sí y considerándose a A₂B₁ como el tratamiento que obtuvo mejores resultados para este parámetro. Al respecto, estos valores superaron a los obtenidos por Valderrama *et al.* (2003) empleando solo jacinto de agua, notándose en este caso la disminución promedio del parámetro coliformes fecales en un 99,00 % a los 6 días de retención o estancamiento. En cambio, Coronel (2016) obtuvo valores similares con una remoción de 99,99 % de coliformes fecales. Cabe mencionar que actualmente los coliformes fecales son denominados coliformes termotolerantes, debido a que algunas especies dentro del grupo pueden tener origen no fecal (Chiroles *et al.*, 2007).

De forma similar, los indicadores de la variable dependiente, a los 14 días de retención, tales como pH y DBO₅ mostraron un mejor comportamiento para A₂B₂; mientras que la temperatura, sólidos totales en suspensión y coliformes termotolerantes no mostraron diferencia estadística entre los tratamientos propuestos. Seguidamente, se hace el análisis de cada indicador para el tratamiento con jacinto de agua a los 14 días de retención.

La temperatura alcanzó valores medios de 19,60 °C en A₁B₂ y 20,00 °C en A₂B₂, reduciéndose en 1,45 °C y 1,35 °C, de forma respectiva, en relación del tratamiento anterior (7 días de retención) y hasta en 5,90 °C con relación del afluente. Esta variación se debería a que este parámetro es dependiente de la cantidad de cobertura presente en el estanque, que en el caso del jacinto de agua podría llegar a duplicar su población hasta en 12 días en verano (García, 2012).

Los sólidos totales en suspensión, por otro lado, se incrementaron con respecto al tratamiento con jacinto de agua a los 7 días de retención alcanzando medias de 6,85 mg/L en A₁B₂ y 6,20 mg/L en A₂B₂; y mostrando un comportamiento estadísticamente similar.

El pH presentó valores medios de 7,50 en A₁B₂ y 7,41 en A₂B₂, en comparación con el tratamiento anterior (7 días de retención), con una diferencia de 0,72 y 0,02 unidades, respectivamente; aproximándose más hacia la neutralidad. En estudios similares, García (2012) llegó a obtener un valor de hasta 6,86 unidades a los 14 días de retención. De igual manera, la DBO₅ continuó disminuyendo hasta alcanzar una media de 3,00 mg/L para A₁B₂ y 2,00 mg/L para A₂B₂, presentando diferencias estadísticas entre sí, y, más aún, con el grupo control. Esta reducción estaría relacionada con la remoción de materia orgánica por microorganismos asociados a la zona radicular de planta y a la acción de la misma como filtro (Valderrama, 1996).

El contenido de coliformes termotolerantes, a los 14 días de retención, descendió de manera importante con relación al grupo control y al tratamiento anterior, removiéndose prácticamente en su totalidad la presencia de éstos en los efluentes de los tratamientos propuestos; de forma tal que se alcanzó una media de 1,80 NMP/100 mL para A₁B₂ y de 1,90 NMP/100 mL para A₂B₂.

En el tercer sistema, a través del cual los efluentes del tratamiento anterior fueron sometidos de forma paralela a cloración con hipoclorito de calcio: A₁B₂C₁: 0,5 (m³/día)/m² + 14 días de retención + Ca(ClO)₂, y A₂B₂C₁: 1 (m³/día)/m² + 14 días de retención + Ca(ClO)₂, los indicadores de la variable dependiente considerados, tales como la temperatura, sólidos totales en suspensión, pH, DBO₅

y coliformes termotolerantes mostraron un comportamiento estadísticamente similar tanto en A₁B₂C₁ como en A₂B₂C₁, sin distinguirse diferencias apreciables entre ellos. Al respecto, cabe destacar que no se han encontrado antecedentes relacionados a la cloración de agua residual con hipoclorito de calcio a este nivel.

La temperatura tuvo valores medios de 21,85 °C en A₁B₂C₁ y 21,95 °C en A₂B₂C₁; así mismo, los sólidos totales en suspensión fueron removidos hasta alcanzar una media de 7,60 mg/L en A₁B₂C₁ y 6,25 mg/L en A₂B₂C₁, no existiendo diferencia estadística entre sí, mas sí con el grupo control, presentando valores inferiores a éste.

El pH, por su parte, presentó una media de 7,86 unidades en A₁B₂C₁ y 7,78 en A₂B₂C₁, manteniendo aún la tendencia de valores superiores al grupo control.

La concentración de la DBO₅ fue notablemente menor que la del grupo control, encontrándose ya sobre los límites de detección del método de análisis para este parámetro, con medias de 2,00 mg/L para A₁B₂C₁ y de 1,85 mg/L para A₂B₂C₁. Situación que se observó de forma similar para coliformes termotolerantes, donde también se alcanzaron valores sobre el límite de cuantificación del método analítico aplicado, con medias de 1,80 NMP/100 mL para A₁B₂C₁ y de 1,90 NMP/100 mL para A₂B₂C₁, encontrándose prácticamente ausentes en el efluente. Al respecto, otros autores como Reyes (2016), también reportaron una reducción del 99,9999 % de coliformes termotolerantes luego de un tratamiento terciario de desinfección con cloro (en este caso con cloro gaseoso) en los meses de primavera y verano.

Finalmente, los resultados del análisis de varianza y la prueba de comparación de medias de Tukey entre los sistemas de tratamiento propuestos (A: Tratamiento con lombrices, AB: Tratamiento con lombrices + jacinto de agua y ABC: Tratamiento con lombrices + jacinto de agua + hipoclorito de calcio), y el afluente sin tratamiento, mostraron que existen diferencias significativas entre ellos, arrojando mejores resultados para el sistema AB en la mayoría de indicadores de la variable dependiente considerados, seguido por ABC.

Respecto del afluente, la temperatura tuvo un descenso de 0,83 °C para A, 5,00 °C para AB y 3,60 °C para ABC, respectivamente, existiendo diferencias estadísticas entre los sistemas propuestos, teniendo AB y ABC un mayor efecto en el descenso de los valores de este parámetro.

Los sólidos totales en suspensión alcanzaron una eficiencia de remoción de 61,11 % para el sistema A, 94,48 % para AB y 93,01 % para ABC. En este caso, sí existió diferencia estadística entre los sistemas evaluados; considerándose tanto a AB como a ABC como los sistemas que tuvieron un mayor efecto en la reducción de este parámetro.

El pH, por otro lado, mantuvo valores superiores en todos los sistemas, respecto al agua sin tratar, alcanzando medias de 8,27, 7,51 y 7,82 unidades en los afluentes de A, AB y ABC, respectivamente. Valores elevados de pH en el primer sistema fueron relacionados líneas arriba a la actividad de las glándulas calcíferas de las lombrices (Somarriba y Guzmán, 2004), descendiendo durante su tratamiento con jacinto de agua, e incrementándose nuevamente a la salida del tratamiento con hipoclorito de calcio, debido a las propiedades de “esta sal [que] al disolverse eleva el pH de la solución” (Castro, s. f.). Por tal motivo, existieron

diferencias significativas entre los sistemas propuestos, siendo AB el que presentó valores de pH más cercanos a la neutralidad.

La DBO₅ presentó una eficiencia de remoción de 50,14 % para A, 98,41 % para AB y 98,98 % para ABC, demostrando estadísticamente que AB y ABC fueron los sistemas más eficientes en la reducción de la concentración de la DBO₅ del afluente. De manera similar, las coliformes termotolerantes experimentaron una reducción de 99,71 % en A, y de 100,00 % tanto en AB como ABC, situación que fue reafirmada estadísticamente a través de la prueba de comparación de medias de Tukey, definiéndose que tanto AB como ABC fueron los sistemas que tuvieron mayor efecto en la reducción de este parámetro.

Los resultados obtenidos fueron comparados también con el Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM, que aprueba los Límites Máximos Permisibles para los efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales, observándose que todos los valores obtenidos a la salida de los tres sistemas propuestos cumplen con los límites establecidos en esta normativa para los parámetros de temperatura, sólidos totales en suspensión, pH y DBO₅. Por otro lado, las coliformes termotolerantes no cumplieron con la norma nacional ni con las Directrices recomendadas por la OMS sobre la calidad microbiológica de las aguas residuales empleadas en agricultura, a la salida del sistema con lombrices; sin embargo, sí lo hicieron posteriormente a la salida de los sistemas con jacinto de agua y con hipoclorito de calcio (ver apéndice - tabla 6, tabla 7 y tabla 8 en instrumentos de recolección de datos).

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Primera. Se evaluaron tres sistemas de depuración, determinándose como el más eficiente para el tratamiento de aguas residuales domésticas en Moquegua al sistema conformado por lombrices (*Eisenia foetida*) y jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*), con un descenso medio de 5 °C, 94,48 % de STS, 98,41 % de DBO₅, 100 % de coliformes termotolerantes, y un pH de 7,51.

Segunda. A través del análisis de los parámetros considerados, se determinaron las características físicas, químicas y microbiológicas del afluente, conociéndose que el agua residual presentó una temperatura de 25,50 °C, un pH neutro de 7,38, y concentraciones típicas de 99,00 mg/L de sólidos totales en suspensión, 188,13 mg/L de DBO₅, y $2,40 \times 10^7$ NMP/100 mL de coliformes termotolerantes.

Tercera. Los tres sistemas propuestos fueron aplicados para el tratamiento de aguas residuales domésticas. El primero, con lombrices, fue evaluado en función de dos tasas de riego, las cuales presentaron efectos similares.

El segundo, lombrices + jacinto de agua, evaluado a dos tiempos de retención, presentó mejores resultados para el efluente de 1 (m³/día)/m² a los 14 días. Y en el tercero, lombrices + jacinto de agua + hipoclorito de calcio, se presentaron efectos similares entre tratamientos.

Cuarta. Se analizaron las características físicas, químicas y microbiológicas de los efluentes, determinándose que el sistema más eficiente fue el integrado por lombrices + jacinto de agua, seguido por el sistema lombrices + jacinto de agua + hipoclorito de calcio y, por último, el sistema con lombrices.

5.2 Recomendaciones

Primera. Efectuar la investigación propuesta durante los meses de otoño, invierno y primavera con la finalidad de conocer el desarrollo de las especies bajo estas condiciones, así como su eficiencia en el tratamiento. Así mismo, se recomienda realizar el análisis de los efluentes considerando a su vez otros parámetros de la normativa vigente.

Segunda. Realizar la medición de caudales y muestreo del afluente considerando lo establecido en la Norma OS.090 del Reglamento Nacional de Edificaciones, para determinar un diseño a escala que se ajuste a las condiciones reales en campo.

Tercera. Aplicar in situ el sistema propuesto que presentó mejores resultados, para determinar su eficiencia en condiciones de campo, a fin de realizar los ajustes y mejoras pertinentes. Así mismo, realizar el

análisis del humus de las lombrices y de la anatomía del jacinto de agua, a fin de determinar su disposición post-tratamiento.

Cuarta. Analizar periódicamente los efluentes del sistema de tratamiento más eficiente, en base al Protocolo de Monitoreo de la Calidad de los efluentes de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales, a fin de determinar su eficiencia en el tiempo, así como las necesidades de cambio de sustrato y retiro de humus para las lombrices, y cosecha para jacinto de agua.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Water Works Association. (1991). *Back to basics guide to disinfection with chlorine [De regreso a la guía básica para la desinfección con cloro]*. Recuperado de <http://www.bvsde.paho.org/eswww/fulltext/repind55/backbasi/backbasi.html>
- Banco Mundial. (31 de diciembre de 2015). Un 70% de las aguas residuales de Latinoamérica vuelven a los ríos sin ser tratadas. Recuperado de <http://www.bancomundial.org/es/news/feature/2014/01/02/rios-de-latinoamerica-contaminados>
- Bidatek. (2007). Vermifiltro BIDATEK: depuración sin generación de lodos. Recuperado de <http://bidatek.com/vermifiltro-bidatek/>
- Carbotecnia. (20 de mayo de 2015). Desinfección con cloro [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://www.carbotecnia.info/desinfeccion-con-cloro/>
- Castillo, R. (2013). *Valores agregados de la biodigestión anaerobia del jacinto de agua* (tesis de maestría). Universidad de Cuenca. Cuenca, Ecuador. Recuperado de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/5052>
- Castro, E. (s. f.). *Principios de control microbiológico con oxidantes* [versión PDF]. Recuperado de <https://www.micof.es/bd/archivos/archivo1956.pdf>
- CBArq Arquitectura, Construcción y Diseño. (2015). Lombrifiltros. Recuperado de <http://www.cbarq.com.ar/2015/05/lombrifiltros-tratamiento-y-recuperacion-de-efluentes-ecologico/>
- Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. (s. f.). *Medidas de protección sanitaria en el aprovechamiento de aguas residuales*. Recuperado de <http://www.bvsde.ops-oms.org/eswww/fulltext/repind53/dis/dis.html#discap72>

- Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. (1988). *Sistemas de abastecimiento de agua para pequeñas comunidades: tecnología de pequeños sistemas de abastecimiento de agua en países en desarrollo*. Recuperado de <https://www.ircwash.org/sites/default/files/201-88SI-6153.pdf>
- Chiroles, S., González, M., Torres, T., Valdés, M. y Domínguez, I. (2007). Bacterias indicadoras de contaminación fecal en aguas del río Almendares (Cuba). *Higiene y Sanidad Ambiental*, 7, 222-227. Recuperado de [http://www.salud-publica.es/secciones/revista/revistaspdf/bc51015c5d937c3_Hig.Sanid.Ambient.7.222-227\(2007\).pdf](http://www.salud-publica.es/secciones/revista/revistaspdf/bc51015c5d937c3_Hig.Sanid.Ambient.7.222-227(2007).pdf)
- Cifuentes, O. y Sartor A. (2012). *Propuesta de Ley Nacional para el reúso de aguas residuales. 18° Congreso Argentino de Saneamiento de Medio Ambiente*. Asociación Argentina de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del ambiente - AIDIS Buenos Aires. Recuperado de www.edutecne.utn.edu.ar/monografias/aidis_ley_reuso_aguas.pdf
- Comett, M., Orta, M., y Monje I. (s. f.). *Efecto del cloro sobre las propiedades físicas y químicas del agua residual*. Coyoacán, México. Recuperado de <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/aresidua/mexico/01381e14.pdf>
- Coronel, N. (2015). *Diseño e implementación a escala de un biofiltro Tohá en la ESPOCH para la depuración de aguas residuales domésticas procedentes de la comunidad Lagos La Nube* (tesis de pregrado). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
- Coronel, E. (2016). *Eficiencia del jacinto de agua (Eichhornia crassipes) y lenteja de agua (Lemna minor) en el tratamiento de las aguas residuales de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas* (tesis

de pregrado). Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, Chachapoyas, Perú.

Clavería, C. (2005). *Estudio de factibilidad para producir harina a partir de lombriz roja californiana (Eisenia foetida) para ser utilizado en la elaboración de concentrados para animales en Guatemala* (tesis de pregrado). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.

Curt, M. (2004a). Fitodepuración en humedales: conceptos generales. En J. Fernández González (coord.), *Manual de fitodepuración: filtros de macrófitas en flotación* [versión PDF]. España: EDITA. Recuperado de <https://www.fundacionglobalnature.org/macrophytes/documentacion/Cap%EDtulos%20Manual/Cap%EDtulos%205.pdf>

Curt, M. (2004b). Macrofitas de interés en fitodepuración. En J. Fernández González (coord.), *Manual de fitodepuración: filtros de macrófitas en flotación* [versión PDF]. España: EDITA. Recuperado de <http://www.fundacionglobalnature.org/macrophytes/documentacion/Cap%EDtulos%20Manual/Cap%EDtulos%207.pdf>

Decreto Supremo N° 001-2010-AG. Reglamento de la Ley de Recursos Hídricos (Ley N° 29338) (24 de marzo de 2010). Recuperado del sitio web del Diario Oficial El Peruano: <http://diariooficial.elperuano.pe/Normas>

Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM. Aprueba Límites Máximos Permisibles para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales (17 de marzo de 2010). Recuperado del sitio web del Diario Oficial El Peruano: <http://diariooficial.elperuano.pe/Normas>

Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L. y Andrade, M. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales* [versión PDF].

Cochabamba, Bolivia: Centro andino para la gestión y uso del agua (Centro AGUA). Recuperado de http://www.infoandina.org/sites/default/files/publication/files/depuracion_de_aguas_residuales_por_medio_de_humedales_artificiales.pdf

Déniz, F. (2010). *Análisis estadístico de los parámetros DQO, DBO₅ y SS de las aguas residuales urbanas en el ensuciamiento de las membranas de ósmosis inversa* (tesis doctoral). Universidad Las Palmas de Gran Canaria, Las Palmas de Gran Canaria, España.

De Miguel, E. (2004). Las aguas residuales: normativas. En J. Fernández González (coord.), *Manual de fitodepuración: filtros de macrófitas en flotación* [versión PDF]. España: EDITA. Recuperado de <http://www.fundacionglobalnature.org/macrophytes/documentacion/Cap%EDtulos%20Manual/Cap%EDtulos%201%20a%202.pdf>

Fernández, J. (2004). Humedales artificiales para depuración. En J. Fernández González (coord.), *Manual de fitodepuración: filtros de macrófitas en flotación* [versión PDF]. España: EDITA. Recuperado de <https://www.fundacionglobalnature.org/macrophytes/documentacion/Cap%edtulos%20Manual/Cap%edtulos%206.pdf>

García, M. y Solano, V. (2005). *Manual cría de la lombriz de tierra: una alternativa ecológica y rentable*. Recuperado de <https://books.google.com.pe/books?isbn=9588233321>

García, P., Fernández, R. y Cirujano, S. (2009). *Habitantes del agua: macrófitos*. [versión PDF]. Recuperado de www.jolube.es/pdf/libro_macrofitos_andalucia_2010.pdf

- García, Z. (2012). *Comparación y evaluación de tres plantas acuáticas para determinar la eficiencia de remoción de nutrientes en el tratamiento de aguas residuales domésticas* (tesis de pregrado). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
- Gobierno Regional de Moquegua. (2013). Programa Regional de Población de Moquegua 2013 - 2018. Recuperado de https://www.mimp.gob.pe/webs/mimp/sispod/PROGRAMAS%20REGIONALES/Moquegua/PROG_MOQUEGUA.pdf
- Gobierno Regional Moquegua. (s. f.). *Plan regional de saneamiento 2013-2021*. Moquegua, Perú: Autor. Recuperado de <http://es.slideshare.net/MaritzaRamosChicalla/plan-regional-de-saneamiento-2013-2021>
- González, E. (2007). *Comparación del proceso de desinfección utilizando hipoclorito de calcio (HTH) y el sistema de generación in situ de hipoclorito de sodio* (tesis de pregrado). Universidad de La Salle, Bogotá, Colombia.
- Guzmán, M. (2004). *Estudio de factibilidad de la aplicación del Sistema Toha en la planta de tratamiento de aguas servidas de Valdivia* (tesis de pregrado). Universidad Austral de Chile, Chile.
- Hammeken, A. y Romero, E. (2005). *Análisis y diseño de una planta de tratamiento de agua residual para el municipio de San Andrés Cholula* (tesis de pregrado). Universidad de las Américas Puebla, Puebla, México
- Hernández, J. (11 de diciembre de 2014). *Cloración en los procesos de tratamiento de aguas residuales urbanas*. Recuperado de <http://www.microlabindustrial.com/blog/cloracion-en-los-procesos-de-tratamiento-de-aguas-residuales>

- Hernández, P. (2005). *Anteproyecto de construcción para aplicación de lombricultura al tratamiento de planta Llau-Llao de Salmonera Invertec S.A.* (tesis de pregrado). Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile.
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2000). Conociendo Moquegua. Recuperado de https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib0435/Libro.pdf
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2007). Censos nacionales 2007: XI Censo de población y VI de vivienda. Sistema de consulta de resultados censales [en línea]. Recuperado de <http://censos.inei.gob.pe/cpv2007/tabulados/#>
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2008). Perú: crecimiento y distribución de la población, 2007. Recuperado de http://censos.inei.gob.pe/censos2007/documentos/Resultado_CPV2007.pdf
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2010). Boletín departamental N° 18. Moquegua: principales resultados del IV Censo Nacional Económico 2008. Recuperado de <http://censos.inei.gob.pe/cenec2008/boletines/Moquegua.pdf>
- Kosaka, R., Palza, H., Farfán, E., Gonzáles, E., Minaya, A. y Ticona, J. (2001). *Evaluación de peligros de la ciudad de Moquegua*. Recuperado de http://bvpad.indeci.gob.pe/doc/estudios_CS/Region_Moquegua/mariscal_nieto/moquegua.pdf
- Kuon, L. (1980). *Retazos de la historia de Moquegua*. Recuperado de <http://www.luiskuoncabello.com/retazos-de-moquegua.html>
- Laboratorio de investigación y servicios. (2018). *Informe de ensayo físico químico* (Reportes N° 19142-18, N° 19143-18 y N° 19144-18). Moquegua, Perú.

- Laboratorio de salud ambiental de la Subgerencia de Salud Ambiental Moquegua.
(2018). *Informe de ensayo* (Informes N° 061.18, N° 065.18, N° 099.18, N° 100.18, N° 109.18 y N° 130.18). Moquegua, Perú.
- Loza, M., Choque, B., Pillco, H., Huayta, D., Chambi, I. y Cutili, B. (2010, octubre-diciembre). Comportamiento de lombriz roja californiana y lombriz silvestre en bosta bovina y rumia bovina como sustrato. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 1(4), 555-565. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342010000400008
- Martelo, J. y Lara, J. (2012, enero-junio). Macrófitas flotantes en el tratamiento de aguas residuales; una revisión del estado del arte. *Ingeniería y Ciencia, ing. cienc.*, 8(15), 221-243. Recuperado de <http://www.redalyc.org/pdf/835/83524069011.pdf>
- Martínez, C., Romero, R., Corlay, L., Trinidad, A. y Ramírez, L.F. (1999). *Lombricultura y abonos orgánicos*. Recuperado de <https://books.google.com.pe/books?id=vJ8qAAAAAYAAJ>
- Merzthal, G. (Comp.). (2007). *Panorama de la situación del tratamiento y uso de aguas residuales y de la agricultura urbana en la ciudad de Lima (Perú)* [versión PDF]. Lima, Perú. Recuperado de: http://www.switchurbanwater.eu/outputs/pdfs/W5-2_CLIM_RPT_D5.2.1_Situation_Analysis_-_Annex_3_Lima.pdf
- Metcalf & Eddy. (1995). *Ingeniería de aguas residuales: tratamiento, vertido y reutilización* (Juan de Dios Trujillo, trad.). España: Interamericana de España, S.A.U. (Obra original publicada en 1991).
- Ministerio del Ambiente. (2009). *Manual para municipios ecoeficientes* [versión PDF]. Lima, Perú: ENOTRIA S.A. Recuperado de

http://www.minam.gob.pe/calidadambiental/wp-content/uploads/sites/22/2013/10/manual_para_municipios_ecoeficientes.pdf

Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental. (2014a). *Fiscalización ambiental en aguas residuales* [versión PDF]. Lima, Perú: Autor. Recuperado de https://www.oefa.gob.pe/?wpfb_dl=7827

Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental. (2014b). Fiscalización eficiente [Sección publicitaria especial]. *Caretas*, (2345). Recuperado de <http://www.youblisher.com/p/958644-Encarte-OEFA-Revista-Caretas/>

Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura [UNESCO]. (2017). *Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2017. Aguas residuales: el recurso desaprovechado*. (Soledad Insiburo, trad.). París, Francia: UNESCO (Obra original publicada en 2017). Recuperado de: <http://unesdoc.unesco.org/images/0024/002476/247647s.pdf>

Padilla, F. y Cuesta, A. (2003). *Zoología aplicada*. Madrid, España: Ediciones Díaz de Santos, S.A. Recuperado de <https://books.google.com.pe/books?isbn=8479785888>

Poma, V. y Valderrama, A. (2014, julio-setiembre). Estudio de los parámetros fisicoquímicos para la fitorremediación de cadmio (II) y mercurio (II) con la especie *Eichhornia Crassipes* (jacinto de agua). *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 80(3), 164-173. Recuperado de: http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S1810-634X2014000300003&script=sci_arttext

Quinchel, J. (2015). *Plan de gestión de manejo de sistema sanitario de aguas servidas por sistema Tohá, Putre*. Recuperado del sitio web de la Ilustre Municipalidad de Putre: <http://www.imputre.cl/Gescam/Doc%20SCAM/Informe/1PlanManejoSistAguasResidualesSistToha-Putre.pdf>

- Ramalho, R. (1990). *Tratamiento de aguas residuales* (D. Jiménez, F. De Lora, R.S. Ramalho e Ingenieros de Calminos, trad.). Barcelona, España: Editorial Reverté, S.A. (Original en inglés, 1983).
- Ramón, J., León, J. y Castillo, N. (2015). Diseño de un sistema alternativo para el tratamiento de aguas residuales urbanas por medio de la técnica de lombrifiltros utilizando la especie *Eisenia foetida*. *Revista Mutis*, 5(1), 46-54. doi: <https://doi.org/10.21789/22561498.1018>
- Reyes, M. (2016). *Uso del cloro en las plantas de tratamiento de aguas residuales domesticas: desinfección y formación de subproductos* (tesis de maestría). Instituto Politécnico Nacional, Durango, México.
- Robles, W. y Madsen, J. (2015). *Jacinto de agua [Eichhornia crassipes (Mart.) Solms]*. Mayagüez, Puerto Rico. Recuperado de http://atlas.eea.uprm.edu/sites/default/files/Jacinto%20de%20agua-Eichhornia%20crassipes_0.pdf
- Rodríguez, F. (2005). *Lombricultura para pequeños emprendedores: manual teórico práctico para el manejo comercial de la lombriz roja californiana*. Recuperado de books.google.com/books?id=F00Ky06O2qwC
- Salazar, P. (2005). *Sistema Tohá; una alternativa ecológica para el tratamiento de aguas residuales en sectores rurales* (tesis de pregrado). Universidad Austral de Chile, Chile.
- Schuldt, M. (2006). *Lombricultura: teoría y práctica*. Recuperado de <https://books.google.com.pe/books?isbn=8484764648>
- Somarriba, R. y Guzmán, F. (2004). *Guía de lombricultura* [versión PDF]. Managua, Nicaragua: Universidad Nacional Agraria. Recuperado de <http://repositorio.una.edu.ni/2409/1/nf04s693.pdf>
- Tineo, A. (1994). *Crianza y manejo de lombrices de tierra con fines agrícolas*. Centro Agronómico tropical de Investigación y Enseñanza. Ayacucho, Perú. Recuperado de <https://books.google.com.pe/books?id=occOAQAIAAJ>

- Valderrama, L., Campos, C., Velandia, S. y Zapata, N. (2003). Evaluación del efecto del tratamiento con plantas acuáticas (*E. Crassipes*, *Lemma sp.* y *L. Laevigatum*) en la remoción de indicadores de contaminación fecal en aguas residuales domésticas. Seminario Internacional sobre Métodos Naturales para el Tratamiento de Aguas Residuales.
- Valderrama, T. (julio-diciembre de 1996). Uso de dos especies de macrófitas acuáticas, *Limnobium laevigatum* y *Eichhornia crassipes* para el tratamiento de aguas residuales agro industriales. *Universitas Scientiarum*, 3(1-2), 83-97. Recuperado de <http://revistas.javeriana.edu.co/index.php/scientarium/article/view/5058>
- Vicente, J. (2014). *Propuesta de diseño de un sistema de biofiltro para el tratamiento de aguas residuales producidas en la central termoeléctrica Sacha de la unidad de negocio Termopichincha - CELEC EP* (tesis de pregrado). Universidad Tecnológica Equinoccial, Quito, Ecuador.
- Unidad operativa laboratorio ambiental San Agustín de Torata. (2018). *Informe de ensayo* (Informes N° A-002/2018, N° A-004/2018 y N° A-006/2018). Moquegua, Perú.
- United Nations Environment Programme, World Health Organization, United Nations Human Settlements Programme y Water Supply and Sanitation Collaborative Council. (2004). *Lineamientos sobre el manejo de aguas residuales municipales* [versión PDF]. La Haya, Países Bajos: Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Recuperado de: https://esa.un.org/iys/docs/san_lib_docs/lineamientos_sobre_el_manejo_spanish.pdf