

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
E.P. INGENIERÍA AMBIENTAL



Una Institución Adventista

Tesis de Titulación

Tratamiento de aguas residuales domésticas a nivel familiar, con Humedales Artificiales de flujo subsuperficial Horizontal, mediante la especie macrófita emergente *Cyperus Papyrus* (Papiro)

Tesista:

Reyna Magdalena Fiorela Núñez Burga

Asesora:

Mg. Milda Cruz Huaranga

Lima, 2016

Escucha lo que te mando: Esfuérzate y se valiente. No temas ni desmayes, que yo soy el
Señor tu Dios, y estaré contigo donde quiera que vayas

Josué 1:9

Agradecimiento

En primer lugar, agradecer a Dios por cuidarme y otorgarme las fuerzas necesarias para culminar un objetivo más.

Agradezco infinitamente a mis padres Ricardo Núñez Leiva y Reyna Burga Delgado quienes me apoyaron incondicionalmente en todos los aspectos aun estando lejos. Y a mis hermanas Jhoselyn, Samanta, Daniela y Romina quienes me alentaron en todo el proceso y siempre me sacaron sonrisas en los peores momentos.

Un agradecimiento muy especial a la Magíster Milda Cruz Huaranga, asesora, gracias por su apoyo en todos los momentos y mi defensora en todo el trayecto de culminación. Gracias por su amistad.

Asimismo, a los docentes Natalí Carbo, Linkolk López y Orlando Poma gracias por su apoyo, comprensión y motivación. Y a la Dirección de EP de Ingeniería Ambiental de la Universidad Peruana Unión, por la oportunidad de ser parte de esta Escuela.

Y a mis amigos Lidimed Torres y Fredd Sánchez, que a pesar que estuvieron lejos me apoyaron con sus palabras de ánimo, gracias por compartir hermosos y tristes momentos durante la etapa de universidad. Asimismo, agradezco a Adrián Isuiza por todo el apoyo incondicional. Gracias por sus palabras de ánimo y motivación en todo momento.

Índice general

RESUMEN.....	28
ABSTRAC.....	29
CAPITULO I: INTRODUCCIÓN.....	30
1.1 Identificación del problema.....	30
1.2 Justificación de la investigación.....	33
1.3 Objetivo General.....	34
1.3.1 Objetivos específicos	34
CAPITULO II: REVISIÓN DE LITERATURA	35
2.1 Antecedentes.....	35
2.1.1 A nivel mundial.....	35
2.1.2 A nivel sudamericano.....	37
2.1.3 A nivel nacional.....	39
2.1.4 A nivel local.....	42
2.2 Aguas residuales.....	42
2.3 Tipos de contaminantes de las aguas residuales.....	44
2.3.1 Contaminantes orgánicos	44

2.3.2	Contaminantes inorgánicos.....	45
2.3.3	Contaminantes habituales en las aguas residuales.....	45
2.4	Clasificación de las aguas residuales.....	45
2.4.1	Aguas residuales domésticas.....	46
2.4.2	Aguas residuales industriales.....	46
2.4.3	Aguas residuales municipales.....	46
2.4.4	Aguas residuales hospitalarios.....	46
2.5	Aguas residuales domésticas.....	47
2.5.1	Características.....	47
2.6	Parámetros de control para la utilización de aguas residuales domésticas en la agricultura, y bebida de animales.....	48
2.7	Marco Legal.....	54
2.7.1	Resolución Ministerial N° 176-2010-Vivienda.....	54
2.7.2	Norma OS-090 Planta de Tratamiento de Agua Residual.....	55
2.7.3	Decreto Supremo N° 002-2008-MINAM: Aprueban los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua.....	55

2.7.4	Decreto Supremo N° 015-2015-MINAM: Modifican los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua y establecen disposiciones complementarias para su aplicación.....	55
2.7.5	Ley de Recursos Hídricos N° 29338.....	55
2.7.6	Ley General del Ambiente N° 28611.....	56
2.8	Tipos de tratamientos de aguas residuales domésticas.....	56
2.8.1	Tratamientos preliminar.....	56
2.8.2	Tratamientos primario.....	58
2.8.3	Tratamientos secundario.....	61
2.8.4	Tratamientos naturales.....	67
2.9	Protocolo de muestreo de aguas residuales.....	114
2.9.1	Tipo de muestra.....	114
2.9.2	Selección del punto de monitoreo.....	114
2.9.3	Aforo del caudal.....	116
2.9.4	Toma de muestras.....	118
2.9.5	Cadena de custodia.....	119
2.10	Métodos de análisis de los parámetros presentes en el agua residual.....	119
2.10.1	Nitrógeno Total.....	119

2.10.2	Fósforo Total.....	120
2.10.2	Demanda Biológica de Oxígeno (DBO ₅).....	121
2.10.3	Demanda Química de Oxígeno (DQO).....	121
2.10.4	Coliformes Totales y Termotolerantes o Fecales.....	122
CAPITULO III: MATERIALES Y MÉTODOS.....		123
3.1	Lugar de ejecución.....	123
3.2	Descripción de la vivienda	124
3.3	Caracterización del agua de la vivienda	125
3.4	Características climatológicas de la zona de investigación.....	125
3.5	Materiales y métodos en el sistema de tratamiento de aguas residuales mediante HAFSH.....	126
3.5.1	Aforo del caudal.....	126
3.5.2	Muestreo y análisis de pre tratamiento.....	127
3.5.3	Diseño y construcción de los HAFSH.....	129
3.5.4	Monitoreo del funcionamiento del HAFSH.....	131
3.5.5	Muestreo y análisis de los parámetros post tratamiento.....	132
3.6	Variables de estudio.....	134

3.6.1	Variable independiente.....	134
3.6.2	Variables dependientes.....	134
3.7	Formulación de Hipótesis.....	135
3.8	Estudio y diseño de la investigación.....	135
3.8.1	Tipo de la investigación.....	135
3.8.2	Diseño de la investigación.....	135
3.9	Análisis estadístico.....	136
CAPITULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIONES.....		138
4.1	Estimación del caudal	138
4.2	Diseño del HAFSH	138
4.3	Análisis físico-químico y microbiológicos de los parámetros reales antes y después del tratamiento.....	140
4.3.1	Comparación de los parámetros reales antes y después del tratamiento mediante HAFSH.....	142
4.4	Comparación de los resultados con los Decretos Supremos N° 002-2008-MINAM y la modificatoria el Decreto Supremo N° 015-2015-MINAM.....	161
4.5	Prueba de Normalidad de datos.....	169

4.6	Análisis de T-STUDENT.....	182
4.6.1	Demanda Biológica de Oxígeno (DBO ₅)	182
4.6.2	Demanda Química de Oxígeno (DQO).....	186
4.6.3	Nitrógeno total.....	190
4.6.4	Fósforo Total.....	195
4.6.5	Turbidez.....	199
4.6.6	Potencial de Hidrógeno (pH).....	204
4.6.7	Conductividad Eléctrica.....	208
4.6.8	Sólidos Disueltos Totales.....	212
4.6.9	Oxígeno Disuelto (OD).....	217
4.6.10	Temperatura.....	221
4.6.11	Coliformes Totales.....	226
4.6.12	Coliformes Termotolerantes y Fecales.....	230
CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		236
5.1	Conclusiones.....	236
5.2	Recomendaciones.....	239
REFERENCIAS.....		241

Índice de Figuras

Figura 1. Cribas o cámara de rejas.....	57
Figura 2. Desarenadores.....	58
Figura 3. Tanque Imhoff.....	59
Figura 4. Tanque de sedimentación o decantación	60
Figura 5. Tanque de flotación	61
Figura 6. Lodos activados	63
Figura 7. Sistemas biológicos rotativos de contacto	64
Figura 8. Componentes del biodigestor	66
Figura 9. Lagunajes o lagunas	69
Figura 10. Cultivos acuáticos.....	74
Figura 11. Procesos físicos, biológicos y químicos; así como los componentes de los HA....	80
Figura 12. Ciclo del carbono en los HA	84
Figura 13. Producción, oxidación y transporte a la atmósfera de metano en los HA.....	86
Figura 14. Ciclo del nitrógeno en los HA	90
Figura 15. HA de flujo libre o superficial. (A) Superficie de vegetación emergente; (B) superficial de libre flotación y (C) superficial de hojas flotantes y raíces adheridas.	94

Figura 16. HA subsuperficial de flujo vertical.....	98
Figura 17. HAFSH.....	101
Figura 18. Cyperus papyrus (Papiro).....	113
Figura 19. Mapa de ubicación de la zona de estudio	124
Figura 20. Descripción de la vivienda	125
Figura 21. Diseño de la investigación.....	136
Figura 22. Comparación del parámetro químico DBO antes y después del tratamiento mediante HAFSH	143
Figura 23. Comparación del parámetro químico DQO antes y después del tratamiento mediante HAFSH	144
Figura 24. Comparación del parámetro químico Nitrógeno Total antes y después del tratamiento mediante HAFSH.....	146
Figura 25. Comparación del parámetro químico Fósforo Total antes y después del tratamiento mediante HAFSH.....	147
Figura 26. Comparación del parámetro físico Turbidez antes y después del tratamiento mediante HAFSH.....	149
Figura 27. Comparación del parámetro físico pH antes y después del tratamiento mediante HAFSH	150

Figura 28. Comparación del parámetro físico Conductividad eléctrica antes y después del tratamiento mediante HAFSH.....	151
Figura 29. Comparación del parámetro físico Sólidos Disueltos Totales antes y después del tratamiento mediante HAFSH.....	153
Figura 30. Comparación del parámetro físico OD antes y después del tratamiento mediante HAFSH	154
Figura 31. Comparación del parámetro físico Temperatura antes y después del tratamiento mediante HAFSH.....	155
Figura 32. Comparación del parámetro microbiológico Coliformes Totales antes y después del tratamiento mediante HAFSH.....	156
Figura 33. Comparación del parámetro microbiológico Coliformes Termotolerantes o Fecales antes y después del tratamiento mediante HAFSH.....	157
Figura 34. Gráfico de Normal P-Plot, para determinar la normalidad de datos del parámetro DBO ₅	170
Figura 35. Gráfico de Normal P-Plot, para determinar la normalidad de datos del parámetro DQO.....	171
Figura 36. Gráfico de Normal P-Plot, para determinar la normalidad de datos del parámetro Nitrógeno Total.....	172
Figura 37. Gráfico de Normal P-Plot, para determinar la normalidad de datos del parámetro Fósforo Total.....	173

Figura 38. Gráfico de Normal P-Plot, para determinar la normalidad de datos del parámetro Turbidez	174
Figura 39. Gráfico de Normal P-Plot, para determinar la normalidad de datos del parámetro PH	175
Figura 40. Gráfico de Normal P-Plot, para determinar la normalidad de datos del parámetro CE	176
Figura 41. Gráfico de Normal P-Plot, para determinar la normalidad de datos del parámetro SDT	177
Figura 42. Gráfico de Normal P-Plot, para determinar la normalidad de datos del parámetro Temperatura	178
Figura 43. Gráfico de Normal P-Plot, para determinar la normalidad de datos del parámetro OD.....	179
Figura 44. Gráfico de Normal P-Plot, para determinar la normalidad de datos del parámetro Coliformes Totales.....	180
Figura 45. Gráfico de Normal P-Plot, para determinar la normalidad de datos del parámetro Coliformes Termotolerantes o Fecales	181
Figura 46. Intervalo de confianza de la DBO	184
Figura 47. Campana de Gauss del análisis de la prueba T para muestras relacionadas del parámetro DBO ₅	185
Figura 48. Intervalo de confianza de la DQO	189

Figura 49. Campana de Gauss del análisis de la prueba t para muestras relacionadas del parámetro DQO.....	190
Figura 50. Intervalo de confianza del nitrógeno total.....	193
Figura 51. Campana de Gauss del análisis de la prueba t para muestras relacionadas del parámetro Nitrógeno Total.....	194
Figura 52. Intervalo de confianza del Fósforo Total.....	197
Figura 53. Campana de Gauss del análisis de la prueba t para muestras relacionadas del parámetro Fósforo Total	198
Figura 54. Intervalo de confianza de la Turbidez	201
Figura 55. Campana de Gauss del análisis de la prueba t para muestras relacionadas del parámetro Turbidez.....	202
Figura 56. Intervalo de confianza del pH.....	206
Figura 57. Campana de Gauss del análisis de la prueba t para muestras relacionadas del parámetro pH	207
Figura 58. Intervalo de confianza de la Conductividad Eléctrica.....	210
Figura 59. Campana de Gauss del análisis de la prueba t para muestras relacionadas del parámetro CE	211
Figura 60. Intervalo de confianza de los SDT	215

Figura 61. Campana de Gauss del análisis de la prueba t para muestras relacionadas del parámetro SDT.....	216
Figura 62. Intervalo de confianza del OD.....	219
Figura 63. Campana de Gauss del análisis de la prueba t para muestras relacionadas del parámetro OD.....	220
Figura 64. Intervalo de confianza de la Temperatura	224
Figura 65. Campana de Gauss del análisis de la prueba t para muestras relacionadas del parámetro Temperatura.....	225
Figura 66. Intervalo de confianza de los Coliformes Totales	228
Figura 67. Campana de Gauss del análisis de la prueba t para muestras relacionadas del parámetro Coliformes totales.....	229
Figura 68. Intervalo de confianza de los Coliformes Termotolerantes o Fecales.....	233
Figura 69. Campana de Gauss del análisis de la prueba t para muestras relacionadas del parámetro Coliformes termotolerantes o fecales	234
Figura 70. Cadena de Custodia	275
Figura 71. Informe del laboratorio NKAP, de los parámetros químicos y microbiológicos antes de pasar por el sistema de tratamiento mediante HAFSH	277
Figura 72. Informe del laboratorio NKAP, de los parámetros químicos y microbiológicos después de pasar por el sistema de tratamiento mediante HAFSH.....	279

Figura 73. Limpieza del lugar para la implementación del sistema de tratamiento, mediante HAFSH	283
Figura 74. Excavación para las zanjas	284
Figura 75. Zanjas terminadas	285
Figura 76. Excavación de la cámara de lodos	285
Figura 77. Excavación de la cama del biodigestor	286
Figura 78. Excavación terminada de la Cama del biodigestor y cámara de lodos.....	286
Figura 79. Instalación de tuberías	287
Figura 80. Construcción de la cámara de registro.....	288
Figura 81. Cámara de registro terminado	289
Figura 82. Biodigestor instalado	289
Figura 83. Construcción de la cámara de lodos	290
Figura 84. Cámara de lodos terminado	290
Figura 85. Excavación y compactación del HA.....	291
Figura 86. Revestimiento con plástico al HAFSH.....	292
Figura 87. Cerco perimétrico de ladrillo alrededor del humedal para evitar que el lecho filtrante arrastre al plástico.	293
Figura 88. Llenado del lecho filtrante con arena	294

Figura 89. Llenado del lecho filtrante con grava	294
Figura 90. Excavación para la plantación de la especie Papiro	295
Figura 91. Plantación del Papiro	295
Figura 92. Implementación del HAFSH terminado	296
Figura 93. Colocación de capa de grava mediana al biodigestor para evitar que los aros de plástico (PETS) sean arrastrados por la tubería de salida y obstruyan el proceso	297
Figura 94. Llenado de agua no potable al biodigestor para realizar la prueba hidráulica	298
Figura 95. Salida del agua residual de todo el proceso de tratamiento	298
Figura 96. Toma de muestra para los parámetros físicos (Turbidez, pH, oxígeno disuelto, temperatura, sólidos disueltos totales y conductividad eléctrica)	299
Figura 97. Toma de muestra del parámetro DBO	299
Figura 98. Toma de muestra del parámetro DQO	300
Figura 99. Toma de muestra del parámetro Fósforo Total	300
Figura 100. Toma de muestra del parámetro Nitrógeno Total	301
Figura 101. Toma de muestra del parámetro Coliformes Totales y Fecales	301
Figura 102. Toma del agua residual doméstica después de pasar por el sistema de tratamiento de HAFSH	302

Figura 103. Toma de muestra de los parámetros físicos (Turbidez, pH, oxígeno disuelto, temperatura, sólidos disueltos totales y conductividad eléctrica)	303
Figura 104. Toma de muestra del parámetro DQO.....	303
Figura 105. Toma de muestra del parámetro DBO.....	304
Figura 106. Toma de muestra del parámetro Fósforo Total	304
Figura 107. Toma de muestra del parámetro Nitrógeno Total.....	305
Figura 108. Toma de muestra del parámetro microbiológico Coliformes Totales y Fecales	305
Figura 109. Toma de muestra de agua residual con 12 días de retención	306
Figura 110. Análisis de la turbidez (UNT)	307
Figura 111. Análisis del pH	307
Figura 112. Análisis de la conductividad.....	308
Figura 113. Análisis de SDT.....	308
Figura 114. Análisis de la Temperatura.....	309
Figura 115. Análisis del OD	309
Figura 116. Análisis de la Turbidez.....	310
Figura 117. Análisis del pH	310
Figura 118. Análisis de la Conductividad.....	311

Figura 119. Análisis de SDT.....	311
Figura 120. Análisis de la Temperatura.....	312
Figura 121. Análisis del OD	312
Figura 122. Comparación del agua antes y después del tratamiento	313

Índice de Tablas

Tabla 1 - Parámetros de agua residual para riego de vegetales de tallo alto y bajo, y bebida de animales D. S. N° 002-2008-MINAM.....	48
Tabla 2 - Parámetros de aguas residuales para riego de vegetales y bebida de animales, de la modificatoria el D.S. N° 015-2015-MINAM.....	52
Tabla 3 - Tasas de carga superficial en HAFSH.....	100
Tabla 4 - Medio granular o lecho filtrante en los HAFSH	102
Tabla 5 - Materiales empleados en el diseño y construcción en los HAFSH	106
Tabla 6 - Parámetros físico-químicos y microbiológicos antes y después del tratamiento mediante el sistema de HAFSH	141
Tabla 7 - Remoción de los parámetros físico-químicos y microbiológicos mediante HAFSH del agua residual doméstica	159
Tabla 8 - Comparación de resultados del laboratorio, con el D.S N° 002-2008-MINAM y la Modificatoria el D.S N° 015-2015-MINAM	167
Tabla 9 - Normalidad de datos mediante la Prueba de Shapiro-Wilk para el parámetro DBO	169
Tabla 10 - Normalidad de datos mediante la Prueba de Shapiro-Wilk para el parámetro DQO	170
Tabla 11 - Normalidad de datos mediante la Prueba de Shapiro-Wilk para el parámetro Nitrógeno Total.....	171

Tabla 12 - Normalidad de datos mediante la Prueba de Shapiro-Wilk para el parámetro Fósforo Total	172
Tabla 13 - Normalidad de datos mediante la Prueba de Shapiro-Wilk para el parámetro Turbidez	174
Tabla 14 - Normalidad de datos mediante la Prueba de Shapiro-Wilk para el parámetro PH	175
Tabla 15 - Normalidad de datos mediante la Prueba de Shapiro-Wilk para el parámetro CE	176
Tabla 16 - Normalidad de datos mediante la Prueba de Shapiro-Wilk para el parámetro SDT	177
Tabla 17 - Normalidad de datos mediante la Prueba de Shapiro-Wilk para el parámetro Temperatura	178
Tabla 18 - Normalidad de datos mediante la Prueba de Shapiro-Wilk para el parámetro OD	179
Tabla 19 - Normalidad de datos mediante la Prueba de Shapiro-Wilk para el parámetro Coliformes Totales.....	180
Tabla 20 - Normalidad de datos mediante la Prueba de Shapiro-Wilk para el parámetro Coliformes Fecales.....	181
Tabla 21 - Análisis de comparación de medias del parámetro DBO	184
Tabla 22 - Prueba de T-student de muestras relacionadas del parámetro DBO	185

Tabla 23 - Análisis de comparación de medias del parámetro DQO.....	188
Tabla 24 - Prueba de T-student de muestras relacionadas del parámetro DQO	189
Tabla 25 - Análisis de comparación de medias del parámetro Nitrógeno Total.....	193
Tabla 26 - Prueba de T-student de muestras relacionadas del parámetro Nitrógeno Total ...	194
Tabla 27 - Análisis de comparación de medias del parámetro Fósforo Total	197
Tabla 28 - Prueba de T-student de muestras relacionadas del parámetro Fósforo Total.....	198
Tabla 29 - Análisis de comparación de medias del parámetro Turbidez.....	201
Tabla 30 - Prueba de T-student de muestras relacionadas del parámetro Turbidez	202
Tabla 31 - Análisis de comparación de medias del parámetro pH	205
Tabla 32 - Prueba de T-student de muestras relacionadas del parámetro pH.....	206
Tabla 33 - Análisis de comparación de medias del parámetro CE	210
Tabla 34 - Prueba de T-student de muestras relacionadas del parámetro CE.....	211
Tabla 35 - Análisis de comparación de medias del parámetro SDT	215
Tabla 36 - Prueba de T-student de muestras relacionadas del parámetro SDT	216
Tabla 37 - Análisis de comparación de medias del parámetro OD.....	219
Tabla 38 - Prueba de T-student de muestras relacionadas del parámetro OD	220
Tabla 39 - Análisis de comparación de medias del parámetro Temperatura.....	224

Tabla 40 - Prueba de T-student de muestras relacionadas del parámetro Turbidez	225
Tabla 41 - Análisis de comparación de medias del parámetro Coliformes totales	228
Tabla 42 - Prueba de T-student de muestras relacionadas del parámetro Coliformes totales	229
Tabla 43 - Análisis de comparación de medias del parámetro Coliformes termotolerantes o fecales	233
Tabla 44 - Prueba de T-student de muestras relacionadas del parámetro Coliformes termotolerantes o fecales.....	234
Tabla 45 - Aforo del caudal, método del vertedero.....	270
Tabla 46 - Requisitos para la toma de muestras de aguas y su preservación.....	271

Índice de Anexos

Anexo 1. Método del vertedero	270
Anexo 2. Requisitos para la toma de muestra de aguas y su preservación	271
Anexo 3. Cadena de Custodia.....	275
Anexo 4. Informe de los parámetros químicos y microbiológicos pre, otorgados por el laboratorio NKAP	276
Anexo 5. Informe de los parámetros químicos y microbiológicos post, otorgados por el laboratorio NKAP	278
Anexo 6. Planos del sistema de tratamiento desde el baño hasta el HA, corte A-A.....	280
Anexo 7. Planos del sistema de tratamiento desde el baño hasta el HAFSH, corte planta....	281
Anexo 8. Planos del HAFSH	282
Anexo 9. Construcción del sistema de tratamiento de HAFSH.....	283
Anexo 10. Toma de muestras de los análisis físico-químicos y microbiológicos antes de ingresar al sistema de tratamiento mediante HAFSH	299
Anexo 11. Toma de muestra de los análisis físico-químicos y microbiológicos después de ingresar al sistema de tratamiento mediante HAFSH.....	302
Anexo 12. Toma de muestra de agua residual doméstica con un tiempo de retención de 12 días	306

Anexo 13. Análisis de los parámetros físicos antes de pasar por el sistema de tratamiento de HAFSH	307
Anexo 14. Análisis de los parámetros físicos después de pasar por el sistema de tratamiento de HAFSH.....	310
Anexo 15. Comparación del agua residual domésticas antes y después del tratamiento de HAFSH	313

Símbolos

HA: Humedales artificiales

HAFSH: Humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal

DBO: Demanda Biológica de Oxígeno

DQO: Demanda Química de Oxígeno

SDT: Sólidos Disueltos Totales

OD: Oxígeno Disuelto

CO₂: Dióxido de Carbono

C: Carbono

N₂: Nitrógeno gas

CH₄: Metano

NO₃⁻: Nitrato

O₂: Oxígeno

N₂O: Óxido nitroso

RESUMEN

El propósito de la investigación fue determinar la eficiencia de remoción de las aguas residuales domésticas mediante Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Horizontal. La investigación consistió en tres etapas: el diseño del humedal, construcción del humedal y análisis de datos mediante la prueba T-Student para muestras relacionadas, utilizando el programa Statistica. Las dimensiones del humedal fueron obtenidas a partir del caudal de ingreso ($0.03 \text{ m}^3/\text{día}$) con la Demanda Biológica de Oxígeno (285.10 gr/m^3), obteniéndose un largo de 1.20 m, un ancho de 0.60, una altura de 0.60 m y una pendiente del 1%. El análisis de los resultados demostró que existen diferencias significativas ($p < 0.05$) de todos los parámetros físico (Turbidez, pH, conductividad eléctrica, OD, SDT y temperatura), químicos (DBO, DQO, nitrógeno total y fósforo total) y microbiológicos (Coliformes totales y fecales) antes y después. Los cuales obtuvieron eficiencias del 96% de DBO y DQO, 78% de nitrógeno total, 88% fósforo total, 55% de conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales, 61% de oxígeno disuelto, 96% de turbidez, 68% de pH y 100% Coliformes totales y fecales. En conclusión, existe eficiencia de remoción de los parámetros físico-químicos y microbiológicos antes de pasar por el sistema de tratamiento mediante humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal, con los parámetros físico-químicos y microbiológicos después de pasar por el sistema de tratamiento, demostrando que dicha agua se encuentran dentro de lo establecido por el Decreto Supremo N° 002-2008-MINAM y la modificatoria el Decreto Supremo N° 05-2015-MINAM, indicando que el agua residual doméstica es apta para ser utilizada en el regadío de pastizales.

Palabras claves: Humedales Artificiales de flujo subsuperficial horizontal, agua residual doméstica, eficiencia de remoción, pastizales, decretos supremos.

ABSTRACT

The purpose of the research was to determine the removal efficiency of domestic wastewater by Artificial Wetlands Horizontal Subsurface Flow. The research consisted of three stages: the design of wetland, wetland construction and analysis of data using the Student t-test for related samples, using the Statistica program. The dimensions of the wetland were obtained from the flow of income ($0.03 \text{ m}^3 / \text{day}$) with the Biological Oxygen Demand ($285.10 \text{ g} / \text{m}^3$) to obtain a length of 1.20 m, a width of 0.60 m, a height of 0.60 m and a slope 1%. Analysis of the results showed significant differences ($p < 0.05$) of all physical, chemical and microbiological parameters (turbidity, pH, electrical conductivity, DO, TDS and temperature) (BOD, QOD, total nitrogen and total phosphorus) (total and fecal) coliforms after and before. The efficiencies of BOD and QOD is 96%, 78% of total nitrogen, 88% of total phosphorus, 55% of electrical conductivity and total dissolved solids, 61% of dissolved oxygen, 96% of haze, 68% of pH and 100 % total and fecal coliforms. The conclusion, there are efficiency physic-chemical and microbiological in removal parameters before passing through the treatment system constructed wetlands horizontal subsurface flow, with the physic-chemical and microbiological parameters after passing through the treatment system, showing that said water are within the provisions of the Supreme Decree No. 002-2008-MINAM and amending Supreme Decree No. 05-2015-MINAM, indicating that domestic wastewater is suitable for use in irrigation of pastures.

Keywords: Artificial Wetlands horizontal subsurface flow, domestic wastewater removal efficiency, grasslands, supreme decrees.

CAPITULO I:

INTRODUCCIÓN

1.1 Identificación del problema

Las aguas residuales domésticas (ARD) son el producto final de las actividades diarias del ser humano, las cuales contienen gran cantidad de carga orgánica, está compuesta por: aguas negras procedentes de los inodoros que contienen gran cantidad de Coliformes fecales (Marsilli, 2005); y las aguas grises provenientes de los lavaplatos (grasas, aceites, sales y residuos orgánicos), lavadoras (detergentes) y duchas. Estas aguas presentan un alto contenido en DBO₅, DQO, nitrógeno, fósforo, azufre, metales pesados (plomo, mercurio y arsénico); y gran contenido de Coliformes totales (bacterias, virus y protozoarios) (Estrada, 2010)

Las ARD son recolectadas por el sistema de alcantarillado, que finalmente son vertidas a los cuerpos de agua (ríos, lagos y mar) o utilizadas en la agricultura, sin previo tratamiento (Chalarca, Mejía, & Aguirre, 2007); provocando eutrofización, agotamiento de oxígeno y acumulación de sedimentos, y en la agricultura contaminación de suelos y aguas subterráneas, trayendo como consecuencia la pérdida de especies de flora y fauna de dichos cuerpos (agua y suelo) (UNESCO, 2011).

Estas aguas provocan la aparición de vectores como: moscas, zancudos, ratas y cucarachas; causando enfermedades como: alergias, hepatitis, paludismo y la fiebre amarilla (González & Chiroles, 2010).

A través del tiempo, se han experimentado diversas formas de tratar las aguas residuales domésticas como: tratamientos convencionales, los cuales son los sistemas de tratamiento preliminar conformada por las cribas o cámara de rejillas y los desarenadores, encargados de

retener al material grande (cámara de rejillas), y sedimentar los sólidos suspendidos (sedimentador), asimismo están los tratamientos primarios que tienen como objetivo remover los sólidos orgánicos e inorgánicos sedimentables, entre ellos se encuentran los biodigestores, tanque Imhoff, tanques de sedimentación y tanques de flotación; seguidamente de los tratamientos secundarios que son los procesos biológicos que tienen una eficiencia de remoción de DBO en un 60%, y son: las lagunas de estabilización (aerobias y anaerobias), lodos activados, filtros biológicos, y módulos rotatorios de contacto (Norma OS.090 , 2006)

También, están las tecnologías emergentes mediante membranas y oxidación; y las tecnologías naturales como: los lagunajes y humedales artificiales (Gersberg, Elkins, & Goldman, 1985).

Entre los tratamientos preliminares, aplicables a cualquier zona, se encuentran la cámara de rejillas o también llamadas cribas, las cuales se encargan de retener los sólidos de gran tamaño y son diseñadas de manera manual con una plataforma de operación y drenaje del material cribado con barandas de seguridad (MINAM, 2009).

Asimismo, los biodigestores son aplicables para comunidades como un tratamiento primario, donde el sistema de alcantarillado no existe, y no requieren de energía para su funcionamiento debido a que todo ocurre mediante un proceso de digestión anaerobia (Martí, 2007). Los lodos procedentes de dicho biodigestor son aptos para ser aplicados como abono en la agricultura, y no genera biogás debido a que cuenta con dos fases: la sedimentación de lodos y digestión anaerobia, dando como resultado el agua pretratada, es por ello que es una tecnología limpia y aplicable a nivel familiar (Martínez, 2010). En cuanto a la remoción de materia orgánica tiene una eficiencia del 60% (DIGESA, 2009).

Del mismo modo los humedales artificiales (HA) son tratamientos secundarios, siendo tecnologías económicas y de solución limpia; aplicables a poblaciones pequeñas y de bajos recursos económicos. La diferencia radica en que los HA no requieren de energía para operar, bajo en la producción de lodos, fácil operación y mantenimiento, baja o nada producción de olores, agradable a la vista y sobre todo sustentable (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010).

Los humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSH), son más eficientes en la remoción de la carga orgánica (DBO₅, DQO, fósforo y nitrógeno), como es el caso de Costa Rica, utilizando el papiro (*Cyperus papyrus*) obtuvieron como resultados de remoción de 91% para el caso del DBO₅ y 72% para el DQO. En cuanto a nutrientes, se obtuvo una remoción de 75% para el fósforo soluble. Además, demostró ser apta para crecer en ambientes con temperaturas de 20 a 33°C (Pérez, Alfaro, Sasa, & Agüero, 2012).

De la misma manera, en España, realizaron un trabajo con HAFSH, utilizando el carrizo (*Phragmites australis*), dando como resultado una reducción de 90% con respecto a DBO₅ y DQO, y un 50% de nitrógeno (Forero, 2009).

La eficiencia de remoción de la carga orgánica se debe a que el agua circula horizontalmente a través de un medio granular (arena fina, arena gruesa, grava mediana y grava gruesa), donde se encuentran los rizomas y raíces de las plantas, las cuales dan lugar al crecimiento de los microorganismos, contribuyendo así con la depuración de las aguas residuales domésticas (Heike, Plastzer, Winker, & Muench, 2011).

En el distrito de Bambamarca de la Provincia de Hualgayoc Departamento de Cajamarca, las aguas residuales domésticas no son tratadas adecuadamente principalmente en las comunidades, siendo que estas no tienen un sistema de alcantarillado, y es por ello que las

aguas residuales domésticas son utilizadas directamente en la agricultura, siendo un peligro para la comunidad motivo por el cual se requiere utilizar el tratamiento de aguas residuales mediante humedales artificiales, siendo que es un método eficiente, fácil y económico, y sobre todo donde no se puede implementar tratamientos convencionales debido al alto costo para el tratamiento y no justifica los gastos siendo que la población es mínima y las viviendas están lejanas una de otra.

1.2 Justificación de la investigación

A raíz de las actividades diarias de la población de Bambamarca en la comunidad Cruz Verde, se obtienen aguas residuales domésticas, los cuales son utilizados directamente en la agricultura, contaminando los suelos y los cuerpos subterráneos de agua, provocando la pérdida de flora y fauna en dichos cuerpos, y la infertilidad de suelos.

La aplicación de los humedales artificiales en Bambamarca, será una de las alternativas de solución para la problemática de las aguas residuales domésticas, en el aspecto ambiental porque daremos reuso al agua y se empleara en el regadío de plantas de tallos altos y de tallos bajos no comestibles, asimismo utilizaremos compost natural para mejorar la calidad del suelo, los cuales son provenientes de los lodos del tratamiento de dicha agua, y no generara olores desagradables para la población aledaña, finalmente minimizar los impactos hacia otros cuerpos (agua y suelo) evitando la perdida de flora y fauna (Delgadillo et al., 2010); en el aspecto social permitirá elevar el costo de vida por el aporte cultural en el tratamiento (Luna & Castañeda, 2014) y la estética de la vivienda de la población, y en la salud colectiva reducirá las enfermedades gastrointestinales y otros asociados con la contaminación del agua (Asuman, 2003).; todo esto permitirá mejorar e incrementar la calidad de vida de la población.

Es así, que, con el presente trabajo se busca abrir la posibilidad de tratar las aguas residuales domésticas mediante humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal, mostrando las etapas, procesos y materiales que se debe tener en cuenta para que otras personas continúen investigando y solucionando el problema de las aguas residuales domésticas, claro está con la utilización de tecnologías limpias.

1.3 Objetivo General

Evaluar la eficiencia de remoción de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos (DBO₅, DQO, nitrógeno total, fósforo total, turbidez, temperatura, oxígeno disuelto, sólidos disueltos totales, pH, conductividad, Coliformes totales y fecales) de aguas residuales domésticas con Humedales Artificiales de flujo subsuperficial Horizontal, mediante la especie macrófita emergente *Cyperus Papyrus* (Papiro).

1.3.1 Objetivos Específicos

- Diseñar y construir los humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal.
- Describir la adaptación de la especie macrófita emergente *Cyperus Papyrus* (papiro) en el humedal.
- Comparar los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del afluente y del efluente con la normativa vigente.

CAPITULO II:

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Antecedentes

2.1.1 A nivel mundial

En Isfahán, Irán, en el 2014, la Universidad Tecnológica de Isfahán realizó un estudio de depuración de aguas residuales municipales mediante humedales artificiales de flujo vertical, con el objetivo de determinar la eficiencia de remoción del nitrógeno total y del fósforo total; utilizaron las especies de *Phragmites australis*, *Typha* y *Rush*; los cuales fueron divididos por células para sembrar dichas especies. Los resultados obtenidos fueron: la especie *Typha* removió 49,39% de nitrógeno total y 17,98% de fósforo total, la especie de *Phragmites australis* (carrizo) removió un total de 44,62% de nitrógeno total y 13,22% de fósforo total, y la especie *Rush* removió 27,62% de nitrógeno total y 9,46% de fósforo total. Concluyeron que la especies *Typha* y *Phragmites australis* fueron más eficientes en la remoción de dichos nutrientes (Fazlolahi & Eslaminan, 2014).

Pérez, Alfaro, Sasa, & Agüero en el año 2012, en México, realizaron un trabajo con humedales artificiales, con el objetivo de tratar las aguas residuales negras provenientes de una industria cosmética y farmacéutica, utilizando la especie de macrófita emergente: *Cyperus papyrus* (papiro). Donde se obtuvieron resultados de remoción favorables: 91% para el DBO5, 72% para el DQO, un 75% de remoción de fósforo, solidos suspendidos un 73% y un total de 1600 NMP/100 ml con respecto a Coliformes fecales. Y llegaron a la conclusión que dicha agua tratada es adecuada para la utilización en el riego en la agricultura según el Reglamento de vertidos y reúso de aguas residuales de Costa Rica.

En la ciudad de Pereira, Colombia en año 2010, se construyeron unidades de humedales combinados para el tratamiento de aguas residuales, dichos unidades experimentales se localizaron en la Planta de tratamiento de Agua Residuales de la Universidad Tecnológica de Pereira. Las combinaciones fueron: humedal de flujo vertical seguido de un humedal de flujo vertical con la especie macrófita emergente *Cyperus papyrus* (papiro); humedal de flujo vertical seguido de humedal de flujo vertical sin la especie; humedal de flujo vertical seguido de humedal de flujo horizontal con la especie; humedal de flujo vertical seguido de humedal de flujo horizontal sin la especie; humedal de flujo horizontal seguido de humedal de flujo horizontal con la especie; y finalmente humedal de flujo horizontal seguido de humedal de flujo horizontal sin plantar. Los sistemas fueron alimentados con agua residual clarificada de la Universidad Tecnológica de Pereira mediante la utilización de bombas peristálticas. El agua residual, previo a la alimentación del sistema, fue pre tratada con un tanque de sedimentación para la remoción de Sólidos Suspending Totales (SST). El caudal fue de 24 lt/día. Después de una evaluación cercana a un año, la combinación de humedales construidos de flujo Vertical-Horizontal con la especie, presentaron los mayores rendimientos en la remoción de Coliformes Totales; E. Coli y Huevos de Helmintos en un 90%; en cuanto al DBO₅ y DQO las remociones fueron superiores al 85% en todas las unidades; para el nitrógeno se obtuvo una remoción del 90%. Concluyeron que las unidades de humedales plantas con la especie papiro presentan mayores tasas de remoción (García, 2010)

Asimismo, Vymazal en el año 2007, en Carolina del Norte, EE.UU, desarrolló un trabajo de comparación de la remoción de nitrógeno total y fósforo total de las aguas residuales, entre los dos tipos de humedales artificiales tanto de flujo vertical como horizontal, donde se utilizó la especie macrófitas flotante *Eichhornia crassipes* (Jacinto de agua) para el humedal vertical y para el horizontal las especies de *Typha spp* (totora) y *Phragmites australis* (carrizo),

donde se obtuvieron resultados de nitrógeno total de 40% en humedal vertical, y 55% en el humedales horizontal; en caso del fósforo se obtuvieron valores de 40% para el humedal vertical y 60% para el humedales horizontal. Se llegó a la conclusión de que los humedales de flujo vertical eliminaron con éxito el amoníaco, pero la desnitrificación fue muy limitada; en cambio en los humedales de flujo horizontal proporciona buenas condiciones para la desnitrificación y la nitrificación del amoniaco es limitada. Vymazal recomienda que para tratar el nitrógeno y fósforo de las aguas residuales se debe crear sistemas híbridos los cuales son la combinación de ambos humedales (vertical y horizontal).

2.1.2 A nivel sudamericano

En el departamento de Quiché, Guatemala en el año 2015, se tomó la decisión de mitigar la contaminación por aguas residuales domésticas (aguas grises), tomando en consideración los tratamientos mediante tecnologías naturales, y para ello se implementó un sistema de humedales horizontales de flujo subsuperficial utilizando la especie macrófita emergente *Zantedeschia aethiopica* (cartucho de color blanco). El caudal de ingreso fue de 0.30 m³/día. Los resultados obtenidos fueron: del 100% de remoción de sólidos sedimentables; DBO 56.65%; DQO 37.36%; fosfatos 36.1; y un 39.77% de nitratos. Concluyendo que dicho tratamiento es eficiente en la remoción de la carga de contaminantes siendo aptos para reutilizarlo (Muñoz, 2015).

En Colombia, en la comunidad de Mesa Baja, en el año 2012, se realizó un trabajo con humedales artificiales de flujo subsuperficial a cargo de la Escuela Militar de Cadetes en unión con la empresa de Ingeniería del Ambiente “INAMBIENTE”; en primer lugar, ejecutó la optimización del humedal de dicha comunidad, la cual consta de 1000 personas. El diseño del humedal fue elaborado en concreto de alta resistencia y las áreas de circulación para el personal

están cubiertas en grava; el cual estuvo compuesto por una cámara de rejillas, seguido de canales de quietamiento, cono de retención, tanque séptico y finalmente una cámara de descarga. Las especies utilizadas fueron: *Juncos*, *Papiros* y *Heliconias*. El caudal de ingreso fue de 0.012 lt/seg. Los resultados obtenidos fueron un 95% para el DBO₅, 97% de sólidos totales suspendidos, 60% de nitrógeno total, un 40% de fósforo total, 70 NMP/100 ml de Coliformes fecales y 6,21 de pH. Concluyendo que los humedales artificiales de flujo subsuperficial muestran gran eficiencia en el tratamiento secundario de las aguas residuales domésticas (Torres & Marín, 2012).

En la ciudad de Bogotá, en el año 2011, la Universidad Nacional realizaron un trabajo de un prototipo de humedal artificial al cual denominaron “HUMEDAR I”, utilizando la especie macrófita emergente de *Phragmites australis* (carrizo). Con el objetivo de tratar aguas residuales urbanas. El sistema de depuración involucra un reactor anaerobio de compartimientos paralelos de flujo a pistón, seguido de un humedal artificial de alta tasa conformado por macrófitas nativas y comunes soportadas sobre sustrato de material plástico reciclado con un diseño especial de aproximadamente 300 m²/m³ de superficie específica. Se lograron eficiencias de remoción de la DBO₅ para el humedal en promedio un 45%, de SST obtuvo una eficiencia de remoción en promedio del 92.5 % con un tiempo de retención hidráulico promedio de 3 días. Concluyen, que el sistema funciona adecuadamente y otorga una eficiencia de remoción favorable (Otárola, 2011).

Arroyave & Castaño, en el año 2009, en Banera (Colombia), trabajaron con humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal, utilizando la especie *Cyperus papyrus* (papiro); con la finalidad de tratar las aguas residuales domésticas de la provincia de Banera. Para lo cual se dispusieron cuatro humedales de 90 m² cada uno, con un caudal medio de 0,27 L/s, para una carga hidráulica media aplicada alrededor de 2542 m³/ha. d, y un tiempo de retención

hidráulica de 1,23 días; los cuales fueron construidos a escala real. Se obtuvieron resultado de remoción de 49,58% para DBO₅ y 45,83 % para DQO. Concluyeron que la remoción fue eficiente debido a que antes que el agua ingrese al humedal, pasó por un tanque séptico.

En la localidad de Mesaya en Nicaragua en el año 1996 se implementó un sistema piloto de humedales artificiales horizontal de flujo subsuperficial o llamados también Biofiltros, para determinar la remoción de distintos tipos de parásitos en el de aguas residuales urbanas que generaban 1000 personas, para ser reutilizados en la agricultura para cultivos de maíz, papaya, cítricos, arroz, remolacha, tomate, pipián y cebolla. Las especies utilizadas fueron la *Helagoniengewächs*. El caudal de ingreso a los humedales artificiales fue de 100 m³/día. En dichos humedales se obtuvieron resultados muy favorables debido a que elimino un 100% a los parásitos de *Spulwurm*; un 99.1% los parásitos *Zwergfaden- wurm*; y 100% de remoción de *Peitschenwurm*, *Madenwurm* y *Rinderbandwurm*. Concluyendo que dichas aguas residuales esta aptas para el regadío de las plantaciones según el reglamento de aguas de Nicaragua (Silva, 2000).

2.1.3 A nivel nacional

En la ciudad de Trujillo en la mina Barrick, en el año 2013 se construyó un humedal artificial de flujo superficial utilizando la especie macrófita emergente *Typha angustifolia* (Tifa), debido a que es una especie toleran y de fácil a adaptación a gran variedad de condiciones ambientales; con la finalidad de analizar el potencial y la viabilidad del uso de un humedal artificial en el tratamiento de las aguas residuales domésticas. El caudal de ingreso a dicho humedal fue de 0.376 lt/seg. Los resultados permitieron estimar la eficiencia de remoción del DBO₅ (73,00%), SST (84,00%), Coliformes fecales (93,00%), Coliformes totales (86,00%), y la tasa de incremento de oxígeno disuelto fue del 18,73%; se concluye que los

humedales artificiales son eficientes en la remoción de contaminantes e incremento de oxígeno disuelto (Minchola & Gonzáles, 2013).

En el Asentamiento Humano Los Pinos – Sector de Pampas, distrito de San Juan de Miraflores, Lima, en el año 2007 se llevó a cabo un proyecto de tratamiento de aguas grises mediante humedales artificiales de flujo horizontal utilizando las especies macrófitas emergentes *Canna edulis* (Achira) y *Cyperus papyrus* (papiro), en un área total de 67 m²; con la finalidad de reutilizar dicha agua para el regadío de cactus, tara y agaves. La población a atender fue de 11 familias (55 habitantes); el caudal a tratar fue de 1.2 m³/día, para llegar al humedal el sistema de tratamiento contaba con unidades de pretratamiento: trampa de grasas y sedimentos. Los resultados obtenidos fueron favorables ya que removió un total del 95% de DBO, un 99% de turbidez, 99.9% de E-Coli (Coliformes fecales), y un 100% de Helmintos. Concluyendo que dichas aguas están aptas para el regadío de las especies de cactus, tara y agaves según la normativa peruana. Además, obsequio beneficios alternos como: cambio en el paisaje y sensibilización ambiental (OPS, 2008).

En la localidad de Lacabamaba, región de Ancash, en el año 2006; se implementó un sistema de tratamiento natural mediante humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal, para tratar sus aguas residuales urbanas atendiendo a un total de 1300 habitantes, con la finalidad de reutilizarlo en un biohuerto comunal. El área superficial empleado para dicho sistema fue de 58.5 m². El caudal de ingreso al humedal fue de 104 m³/día; el material poroso utilizado fue piedra chancada de pulgada y media, arena gruesa y confitillo; y la especie macrófita emergente *Phragmites australis* (carrizo) propios de la zona. Los resultados obtenidos fueron muy favorables ya que removió un 90.26% de sólidos suspendidos, 48% de DBO, 60% de nitrógeno amoniacal, 45.45% de fósforo total y 62.70% de Coliformes fecales;

dichos resultados fueron adquiridos con un tiempo de retención de 4.28 días (Programa Pequeños Fondos Competitivos para Investigación, 2007).

Asimismo, en el distrito de Cieneguilla-Perú, en el año 2006, se construyó una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas (aguas grises, provenientes de los servicios higiénicos de la casa de retiros), mediante humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal, utilizando las especies de *Canna edulis* (Achira) y *Phragmites australis* (carrizo); construidos por los padres de la Congregación Redentorista. El caudal de ingreso al humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal era de 8 m³/día. La planta de tratamiento de aguas residuales contaba con un pretratamiento como un atrapagrasas, un tratamiento primario conformado por un biodigestor. Los resultados reportan una remoción del 74% de la DBO₅, 84% de los sólidos suspendidos, 99.4% de Coliformes Termotolerantes y 100% en helmintos (OPS, 2008).

En la ciudad de Lima, Perú, en el año 2003, se construyó una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas provenientes de un asentamiento humano cercano, con humedales artificiales de flujo sub superficial horizontal (UNITRAR), con fines de investigación, la cual fue construida dentro del campus de la Universidad Nacional de Ingeniería, donde ocupó un área de 216 m². El caudal de ingreso a la planta UNITAR es de 0.4 lt/seg, después es derivado hacia el humedal artificial de Flujo Subsuperficial Horizontal utilizando las especies de *Totora* en la mayor parte del lecho y *Canna edulis* (Achira) en el tramo final, luego de pasar por las unidades de pretratamiento (cámara de rejillas y desarenador). La planta de humedales cuenta con un tratamiento primario, el cual consiste en un tanque séptico de 2.500 litros de capacidad. Se logró una alta eficiencia en cuanto a la remoción del DBO₅ con un 80%, 77% de DBO, 85% de sólidos suspendidos, 33% del nitrógeno total, 13% de fósforo total y un 99% de Coliformes Termotolerantes (OPS, 2008).

2.1.4 A nivel local

En el departamento de Cajamarca, no se han registrado estudios acerca del tratamiento de aguas residuales domésticas o cualquier otro tipo de aguas residuales, solo se realizó un estudio sobre la viabilidad de la aplicación de Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales domésticas (aguas negras y grises), como un tratamiento secundario. Concluyendo que Cajamarca si puede tratar sus aguas residuales domésticas, el cual generaría bajos costos en operación y mantenimiento a comparación de una convencional (Arango, 2011).

2.2 Aguas residuales

Son aquellas aguas cuya características originales han sido modificadas por las actividades cotidianas que el ser humano realiza, las cuales requieren de un tratamiento previo antes de ser reutilizadas, vertidas a los cuerpos de agua o descargarlo en el sistema de alcantarillado (OEFA, 2014).

Gran parte de las aguas residuales son vertidas a los cuerpos receptores de agua (ríos, lagos y mar) y suelos, ocasionando efectos mortales como el agotamiento de oxígeno, por la carga de contaminantes, imposibilitando la vida de la flora y fauna existentes en dichos cuerpos (Ocola, 2005). Algunos cuerpos de agua son de gran importancia económica, llegando a un punto de no retorno (UNESCO, 2011).

Es por ello, que en 1973 se realizó la 26a Asamblea Mundial de la Salud, en la cual se publicó el programa de la Organización Mundial de la Salud (OMS) titulado “Salud Humana y Medio Ambiente”, con el objetivo de mejorar la calidad medioambiental, mediante sistemas higiénicos de abastecimiento de agua, la vigilancia de los cuerpos receptores de agua, para

evitar la presencia de contaminantes en ellos y fomentar y coordinar las investigaciones pertinentes para no perjudicar al medio ambiente ni la salud de las personas (Asamblea Mundial de la Salud, 1973).

En una investigación llevada a cabo en el 2003 por el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), informa que en América Latina, el 94% del agua residual se descarga en los cuerpos de agua o se usa sin tratamiento previo para riego, la cual ocasiona enfermedades infecciosas, mortalidad y morbilidad infantil, por la pésima calidad del agua (Mendez & Muñoz, 2010).

Es por ello, que el Perú en el año 2009, tomó la decisión de tratar sus aguas residuales para poder ser reutilizadas en la agricultura, así que emitió la Resolución N° 0291-2009-ANA, donde se dan disposiciones para al otorgamiento de autorizaciones de vertimientos y de reúsos de aguas residuales tratadas, con el propósito de no seguir perjudicando sus cuerpos receptores y eliminar la flora y fauna existente en dichos cuerpos receptores (Mendez & Muñoz, 2010).

Por medio de una revisión exhaustiva de estudios epidemiológicos causados al ser humano al momento de ser manipulado los efluentes, la OMS en 1989 y 2006, publicó “Guías sobre el Uso Seguro de Aguas Residuales en la Agricultura y Acuicultura”, (Silva, 1989); y “Guías para el Uso Seguro de Aguas Residuales, Excretas y Aguas Grises”; con el propósito de manifestar a la población, que deben estar bien protegidos antes de manipular los efluentes, para resguardar su salud, evitando que se contagie de múltiples enfermedades dérmicas, las cuales pueden ser crónicas (OMS, 2013).

En el año 2008 en Perú emitió un Decreto Supremo 002-2008 MINAM, con la finalidad de que las aguas tratadas también pueden ser utilizadas en el riego en la agricultura, y evitar la continua contaminación del medio ambiente (D.S N° 002-2008 MINAM, 2008). Asimismo, en

el año 2015 el MINAM modificó el decreto supremo 002-2008, con el objetivo de ser más precisos en sus parámetros y agregando que también puede ser utilizado para la bebida de animales (D.S N° 015-2015 MINAM, 2015).

2.3 Tipos de contaminantes de las aguas residuales

Los tipos de contaminantes de las aguas residuales son de tres clases:

2.3.1 Contaminantes orgánicos

2.3.1.1 Proteínas

Proviene principalmente de las heces humanas o de desechos de alimentos. Son de fácil degradación, inestables y generan un olor putrefacto, desagradable para el ser humano (Eduardo, 2010).

2.3.1.2 Carbohidratos

Son procedentes de los desperdicios alimenticios y de las excretas humana, estos son los azúcares, almidón y fibras celulósicas (Eduardo, 2010).

2.3.1.3 Aceites y grasas

Son aquellos que provienen de las actividades realizadas en la cocina, (desperdicios alimentarios), de naturaleza lipídica, los cuales son estables, no se mezclan con el agua debido a su menor densidad, provocando la aparición de nata y espumas en la superficie de las aguas residuales (Eduardo, 2010).

2.3.2 Contaminantes inorgánicos

Aparecen en abundancia en las aguas residuales sin importar su procedencia. Principalmente son procedentes de las industrias (aguas residuales industriales). Los contaminantes inorgánicos son de origen mineral y tienen una naturaleza variada, ya que están compuestas por sales, ácidos, óxidos, metales y bases inorgánicas (Eduardo, 2010).

2.3.3 Contaminantes habituales en las aguas residuales

2.3.3.1 Arenas

Son partículas de naturaleza mineral que pueden ser de tamaños variados, que se encargan de enturbiar las masas de aguas residuales cuando estas están en movimiento, y cuando están estancadas forman depósitos de lodos (Eduardo, 2010).

2.3.3.2 Nitrógeno y fósforo

Son procedentes de las aguas grises las cuales están conformadas por detergentes, fertilizantes e incluso en las heces humanas. Son fundamentales para deteriorar las masas acuáticas presentes en las aguas residuales (Eduardo, 2010).

2.3.3.3 Agentes patógenos

Son pequeños organismos que se encuentran en las aguas residuales en cantidades mayores o menores, las cuales pueden causar terribles enfermedades en la salud humana y en el cuerpo receptor (Eduardo, 2010).

2.4 Clasificación de las aguas residuales

Existen tres tipos de aguas residuales que son:

2.4.1 Aguas residuales domésticas

Son aquellos líquidos provenientes de las viviendas, edificios comerciales e institucionales. Que están compuestas por: aguas negras que provienen de los inodoros y aguas grises provenientes de duchas, lavaplatos y lavadoras (Estrada, 2010).

2.4.2 Aguas residuales industriales

Son aquellas aguas que resultan de las actividades realizadas en las distintas industrias, incluyendo la minería; que contienen principalmente metales pesados y sustancias tóxicas para los cuerpos receptores y la vida humana (OEFA, 2014).

2.4.3 Aguas residuales municipales

Son aguas domésticas mezcladas con aguas pluviales o aguas residuales industriales previamente tratadas, para ser admitidas en los sistemas de alcantarillado de tipo combinado (Norma OS 090, 2006).

2.4.4 Aguas residuales hospitalarios

Son aguas cuyas características son similares a las domiciliarias y municipales; las cuales contienen elevadas concentraciones de microorganismo y/o virus (entero bacterias, Coliformes fecales, entre otros), algunos de los cuales pueden haber adquirido multi-resistencia antibiótica, también pueden estar presentes: solventes, metales pesados. Estas aguas componen una mezcla de sustancias complejas cuya actividad tóxica, mutagénica y genotóxica dependerá de interacciones sinérgicas y antagónicas entre sus componentes y el ambiente (Ramos, 2008).

2.5 Aguas residuales domésticas

2.5.1 Características

Las aguas residuales domésticas son de tres tipos de características:

2.5.1.1 Características físicas

Se encuentran los sólidos totales en un rango de 120 mg/l a 175 mg/l, temperatura 35°C, color marrón oscuro y un olor putrefacto. Los sólidos en forma de residuos flotantes y capas de grasa y aceite indican residuos altamente contaminados y son evidencia de residuos no tratados o tratados de manera ineficiente (Manual de Depuración de aguas residuales urbanas, 2008).

2.5.1.2 Características químicas

Encontramos a la demanda biológica de oxígeno (DBO₅) el cual es un indicador de la cantidad de sustancias orgánicas de origen biológico que se encuentran en total de 300 mg/l, el DQO 300 mg/l y de productos químicos orgánicos, sintéticos y biodegradables en las aguas residuales; sustancias inorgánicas en solución: pH en 9, siendo alcalina, cloruros se encuentra un porcentaje de 100 mg/l, alcalinidad 200 mg/l, nitrógeno 85 mg/l, fósforo 20 mg/l, azufre 80 mg/l y compuestos tóxicos 150 mg/l; y por último los gases (oxígeno disuelto, sulfuro de hidrógeno y metano) (Haber, Grego, Langergraber, Kadlec, Cicalini, Martins, Novias, Aubert, Gerth, Thomas & Hebner, 2003).

2.5.1.3 Características biológicas

Se encuentran los organismos patógenos como: las bacterias, virus, protozoarios hongos y algas patógenos (Salas, Pidre, & Cuenca, 2008).

2.6 Parámetros de control para la utilización de aguas residuales domésticas en la agricultura, para vegetales de tallo bajo y alto

Según el Decreto Supremo N° 002-2008-MINAM menciona los límites máximos permisibles para los efluentes antes de ser utilizados en la agricultura en el riego de vegetales de tallo alto y bajo, de categoría 3, son los siguientes parámetros (tabla 1):

Tabla 1

Parámetros de agua residual para riego de vegetales de tallo alto y bajo, y bebida de animales D. S. N° 002-2008-MINAM

Parámetros	Parámetros para riego de vegetales	Parámetros para bebidas de animales	Unidad
	Riego de cultivos de tallo alto y bajo	Bebidas de animales	
FISICOQUÍMICOS			
Bicarbonatos	5		mg/l
Calcio	518		mg/l
Carbonatos	0.1		mg/l
Cloruros	100-700		mg/l
Conductividad	<2000	< = 2000	(us/cm)
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	15	< =15	mg/l
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	40	40	mg/l
Fluoruros	1	2	mg/l
Fosfatos – P	10		mg/l
Nitratos (NO ₃ -N)	0.06	50	mg/l
Nitratos (NO ₂ -N)		1	mg/l
Oxígeno Disuelto	>=4	> 5	mg/l

Ph	6.5 – 8.5	6.5 – 8.4	Unidad de pH
Sodio	200		mg/l
Sulfatos	300	500	mg/l
Sulfuros	0.05	0.05	mg/l
INORGÁNICOS			
Aluminio	5	5	mg/l
Arsénico	0.05	0.1	mg/l
Bario total	0.7		mg/l
Berilio		0.1	mg/l
Boro	0.5-6	5	mg/l
Cadmio	0.005	0.01	mg/l
Cianuro Wad	0.1	0.1	mg/l
Cobalto	0.05	1	mg/l
Cobre	0.2	0.5	mg/l
Cromo (6 ⁺)	0.1	1	mg/l
Hierro	1	1	mg/l
Litio	2.5	2.5	mg/l
Magnesio	150	150	mg/l
Manganeso	0.2	0.2	mg/l
Mercurio	0.001	0.001	mg/l
Níquel	0.2	0.2	mg/l
Plata	0.05	0.05	mg/l
Plomo	0.05	0.05	mg/l
Selenio	0.05	0.05	mg/l

Zinc	2	24	mg/l
ORGÁNICOS			
Aceites y grasas	1	1	mg/l
Fenoles	0.001	0.001	mg/l
S.A.A.M (Detergentes)		1	mg/l
PLAGUICIDAS			
Aldicarb	1	1	ug/l
Aldrín (CAS309-00-2)	0.004	0.03	ug/l
Clordano (CAS 72-20-9)	0.3	0.3	ug/l
DDT	0.001	1	ug/l
Dieldrin (N° CAS 72-20-8)	0.7	0.7	ug/l
Endrín	0.004	0.004	ug/l
Endosulfán	0.02	0.02	ug/l
Lindano	4	4	ug/l
Paratión	7.5	7.5	ug/l
BIOLÓGICOS DE VEGETALES			
	Tallo bajo	Tallo alto	
Coliformes Termotolerantes	1000	2000 (3)	NMP/100mL
Coliformes totales	5000	5000 (3)	NMP/100mL
Enterococos	20	100	NMP/100mL
<i>Escherichia Coli</i>	100	100	NMP/100mL
Huevos de Helmintos	<1	<1 (1)	Huevos/litro

Salmonella sp.	Ausente
Vibrión Cholerae	Ausente

BIOLÓGICOS DE BEBIDAS DE ANIMALES

Coliformes Termotolerantes	1000	NMP/100mL
Coliformes totales	5000	NMP/100mL
Enterococos	20	NMP/100mL
<i>Escherichia Coli</i>	100	NMP/100mL
Huevos de Helmintos	< 1	Huevos/litro
Salmonella sp.		Ausente
Vibrión Cholerae		Ausente

Fuente: (D.S N° 002-2008-MINAM, 2008)

Por otro lado, en la Modificatoria de los Estándares Nacionales de calidad Ambiental para Agua y establecen disposiciones complementarias para su aplicación N° 015-2015-MINAM, hace mención a los parámetros aptos para la categoría 3, que son los parámetros para riego de vegetales y bebida de animales (tabla 2):

Tabla 2

Parámetros de aguas residuales para riego de vegetales y bebida de animales, de la modificatoria el D.S. N° 015-2015-MINAM

Parámetros	Parámetros para riego de vegetales	Parámetros para bebidas de animales	Unidad
	Riego de cultivos de tallo alto y bajo	Bebidas de animales	
FISICOQUÍMICOS			
Aceites y grasas	5	10	mg/l
Bicarbonatos	518	**	mg/l
Cianuro Wad	0.1	0.1	mg/l
Cloruros	500	**	mg/l
Color (b)	100 (a)	100 (a)	Color verdadero escala Pt/Co
Conductividad	2500	5000	(uS/cm)
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	15	15	mg/l
Demanda Química de oxígeno	40	40	mg/l
Detergentes (SAAM)	0.2	0.5	mg/l
Fenoles	0.002	0.01	mg/l
Fluoruros	1	**	mg/l
Nitratos (NO ₃ -N) + Nitritos (NO ₂ -N)	100	100	mg/l
Nitritos (NO ₂ -N)	10	10	mg/l
Oxígeno disuelto (valor mínimo)	4	5	mg/l
pH	6.5 – 8.5	6.5 – 8.4	Unidad de pH
Sulfatos	1000	1000	mg/l
Temperatura	♦3	♦3	°C
INORGÁNICOS			
Aluminio	5	5	mg/l

Arsénico	0.1	0.2	mg/l
Bario	0.7	**	mg/l
Berilio	0.1	0.1	mg/l
Boro	1	5	mg/l
Cadmio	0.01	0.05	mg/l
Cobre	0.2	0.5	mg/l
Cobalto	0.05	1	mg/l
Cromo total	0.1	1	mg/l
Hierro	5	**	mg/l
Litio	2.5	2.5	mg/l
Magnesio	**	250	mg/l
Manganeso	0.2	0.2	mg/l
Mercurio	0.001	0.01	mg/l
Níquel	0.2	1	mg/l
Plomo	0.05	0.05	mg/l
Selenio	0.02	0.05	mg/l
Zinc	2	24	mg/l
PLAGUICIDAS			
Paratión	35	35	ug/l
Órganoclorados			
Aldrín	0.004	0.7	ug/l
Clordano	0.006	7	ug/l
DDT	0.001	30	ug/l
Dieldrin	0.5	0.5	ug/l
Endosulfán	0.01	0.01	ug/l
Endrín	0.004	0.2	ug/l
Heptacloro y Heptacloro epóxido	0.01	0.03	ug/l
Lindano	4	4	ug/l
CARBAMATO			
Aldicarb	1	11	ug/l
POLICLORUROS BIFENILOS TOTALES			

Policloruros	Bifenilos	0.04	0.045	ug/l
Totales (PCB´s)				
MICROBIOLÓGICOS Y PARASITOLÓGICOS				
Coliformes	Totales (35-37°C)	1000	5000	NMP/100mL
Coliformes	Termotolerantes (44.5°C)	1000	1000	NMP/100mL
Enterococos	intestinales	20	20	NMP/100mL
<i>Escherichia Coli</i>		100	100	NMP/100mL
Huevos de Helminos		<1	<1	Huevos/litro

Fuente: (D.S N° 015-2015-MINAM, 2015)

2.7 Marco legal

En el Perú, existen normativas dirigidas a lograr la adecuación ambiental de diversas actividades económicas desarrolladas en el país, existiendo para ello leyes, reglamentos, disposiciones, decretos supremos y otros. Para el desarrollo de este proyecto se tiene en cuenta la siguiente normatividad.

2.7.1 Resolución Ministerial N° 176-2010-Vivienda

En la Resolución Ministerial N° 176-2010-Vivienda, hace mención a los lineamientos de política para la promoción del tratamiento para el reúso de las aguas residuales domésticas y municipales en el riego de áreas verdes urbanas y periurbanas (Ministerio de Vivienda, 2010).

2.7.2 Norma OS-090 Planta de Tratamiento de Aguas Residuales

La norma OS-090 fue aprobada mediante D.S. N° 011-2006-VIVIENDA y modificada por D.S. N° 022-2009-VIVIENDA; en el numeral 3.116, menciona sobre el reúso de aguas residuales debidamente tratadas para un propósito específico (Norma OS.090 , 2006).

2.7.3 Decreto Supremo 002-2008-MINAM: Aprueban los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua

El objetivo principal de dicho decreto es “establecer el nivel de concentración o el grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos presentes en el agua, en su condición de cuerpo receptor y componente básico de los ecosistemas acuáticos, que no representa riesgo significativo para la salud de las personas ni para el ambiente” (MINAM, 2008).

2.7.4 Decreto Supremo 015-2015-MINAM: Modifican los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua y establecen disposiciones complementarias para su aplicación

El objetivo principal del decreto es “modificar los niveles de concentración o el grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y microbiológicos presentes en el agua de categoría 3, para riego de vegetales y bebida de animales (MINAM, 2015).

2.7.5 Ley de Recursos Hídricos N° 29338

Según la Autoridad Nacional del Agua, ANA (2010) se refiere al vertimiento del agua residual y uso del agua.

2.7.6 Ley General del Ambiente N° 28611

Según el MINAM (2009), este código tiene como premisa el “derecho irrenunciable de toda persona tiene a gozar de un ambiente saludable, equilibrado y adecuado para el desarrollo pleno de la vida. El estado está obligado a mantener la calidad de vida de las personas en un nivel compatible con la dignidad humana correspondiéndole prevenir y controlar la contaminación ambiental y cualquier proceso de deterioro de los recursos naturales”.

En el artículo 74, se refiere a las “medidas de seguridad donde de manera directa es prohibido la descarga de sustancias contaminantes que provoquen degradación de los ecosistemas o alteren la calidad del ambiente, sin previamente ser tratada, siendo la autoridad competente la encargada de aplicar las medidas de control y muestreo para velar por el cumplimiento de esta disposición”.

2.8 Tipos de tratamientos de aguas residuales domésticas

2.8.1 Tratamiento preliminar

Sirven para aumentar la efectividad del proceso de depuración; asimismo está enfocado al acondicionamiento de las aguas residuales con el objetivo de proteger las instalaciones, el funcionamiento de las obras de tratamiento y eliminar o reducir sensiblemente las condiciones indeseables relacionadas principalmente con la apariencia estética de las plantas de tratamiento (Rojas, 2002). Las cuales son las cámaras de rejillas y desarenadores.

2.8.1.1 Cribas o cámara de rejillas

Son dispositivos contruidos por barras rectas o curvadas metálicas paralelas e igualmente espaciadas (Días de Morales, 1980). Encargadas de retener los sólidos gruesos que flotan o que se encuentren suspendidos en el agua (figura 1) (Collazos, 2008); deben diseñarse

de manera manual con una plataforma de operación y drenaje del material cribado con barandas de seguridad (MINAM, 2009).



Figura 1. Cribas o cámara de rejas

Fuente: (Collazos, 2008)

2.8.1.2 Desarenadores

Cámara diseñada para reducir la velocidad del agua residual y permitir la remoción de sólidos minerales (arenas y otros), por sedimentación; con la finalidad de retener los sólidos de gran tamaño para evitar que obstaculicen el paso del agua (Norma OS.090 , 2006). La remoción de la arena tiene la finalidad de proteger las bombas contra desgaste, para evitar obstrucciones en tuberías e impedir la formación de depósitos de material inerte en el interior de sedimentadores y digestores; estos pueden ser de limpieza manual o mecánica (Días de Morales, 1980). Los desarenadores pueden ser rectangulares o circulares, de flujo horizontal o helicoidal, y aireadas o no (Collazos, 2008).



Figura 2. Desarenadores

Fuente: (Collazos, 2008)

2.8.2 Tratamiento primario

El tratamiento primario tiene por objetivo remover los sólidos orgánicos e inorgánicos sedimentables, para disminuir la carga en el tratamiento biológico (Norma OS.090 , 2006); ya sea por medios mecánicos o físico; el tratamiento primario aparte de remover materia que incomoda, remueve también carga orgánica como un 25-40% de DBO y 50-65% sólidos suspendidos (Rojas, 2002).

Dichos tratamientos primarios son los tanques Imhoff, tanques de sedimentación y tanques de flotación (MINAM, 2009).

2.8.2.1 Tanque Imhoff

Son tanques de sedimentación primaria en los cuales se incorpora la digestión de lodos en un comportamiento localizado en la parte inferior (Norma OS.090 , 2006). Tienen una forma

rectangular con una tolva en la parte inferior, y está integrado por una cámara superior en forma de V que recibe el agua residual y que tiene la función de separar los sólidos de rápida sedimentación (figura 3). Este material pasa a la cámara inferior a través de una apertura conformada por mamparas de concreto donde será sedimentada y digerida en forma semejante a lo que sucede en una fosa séptica. Este tipo de tratamientos cada vez son menos frecuentes debido al avance tecnológico que hoy en día existe (Noyola, Morgan, & Guereca, 2013).

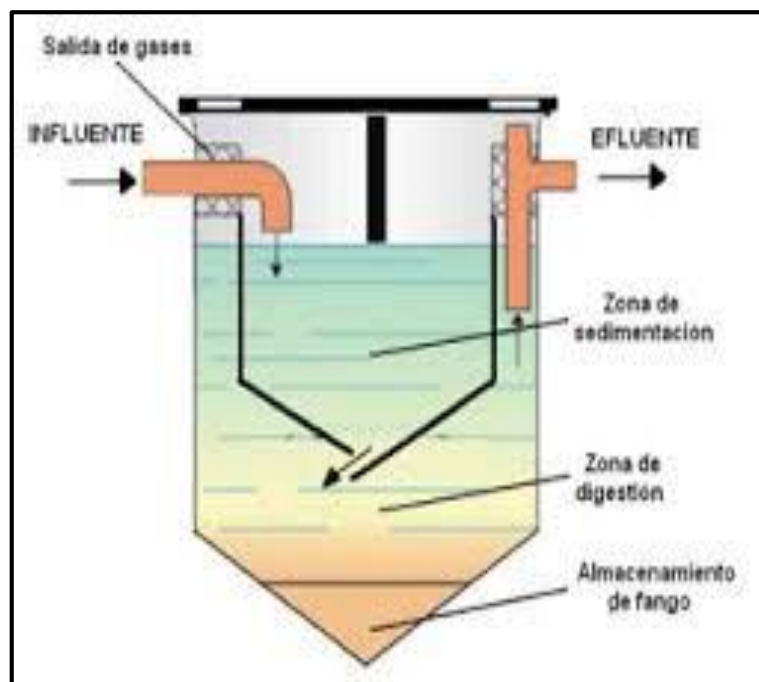


Figura 3. Tanque Imhoff

Fuente: (Noyola, Morgan, & Guereca, 2013).

2.8.2.2 Tanques de sedimentación o decantación

Se encargan de sedimentar los sólidos que aún han pasado por un tratamiento preliminar; ocurre un proceso físico que aprovecha la diferencia de densidad y peso entre el líquido y las partículas suspendidas (sólidos) (Collazos, 2008). La tasa de sedimentación se incrementa en algunas plantas de tratamiento industrial incorporando procesos llamados coagulación y floculación químicas al tanque de sedimentación. La coagulación es un proceso

que consiste en añadir productos químicos como el sulfato de aluminio, el cloruro férrico o Polielectrolitos a las aguas residuales; esto altera las características superficiales de los sólidos en suspensión de modo que se adhieren los unos a los otros y precipitan. La floculación provoca la aglutinación de los sólidos en suspensión. Ambos procesos eliminan más del 80% de los sólidos en suspensión (Pérez, 2005). Estos tanques son de diferentes formas (rectangulares, circular o cuadrado), donde los rectangulares podrán tener varias tolvas y las circulares o cuadradas una tolva central, con una inclinación de 60° para la adecuada evacuación de lodos. Asimismo, son tanques que requieren de equipos mecánicos para el barrido de lodos y transporte a los procesos de tratamiento de lodos (Norma OS.090 , 2006).



*Figura 4. Tanque de sedimentación o decantación
Fuente: (MINAM, 2009)*

2.8.2.3 Tanques de flotación

Se encargan de remover partículas finas en suspensión y de baja densidad, usando el aire como agente de flotación. Una vez que los sólidos han sido elevados a la superficie del líquido, son removidos en una operación de desnatado. Este proceso requiere un mayor grado de mecanización que los tanques convencionales de sedimentación (Norma OS.090 , 2006). Este tipo de tratamientos en las aguas residuales se utiliza para remover aceites, grasas y

aglutinar sólidos suspendidos. La flotación con aire se puede aplicar con o sin recirculación (figura 5) (Collazos, 2008).

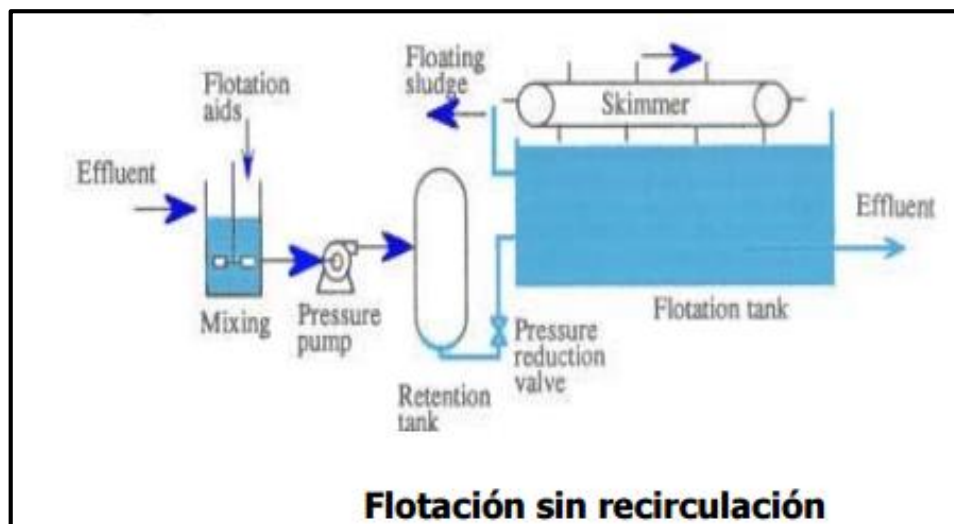
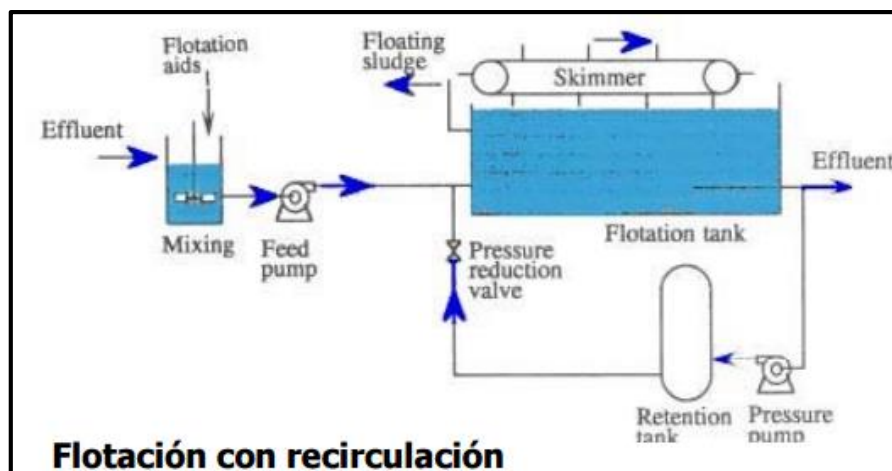


Figura 5. Tanque de flotación

Fuente: (Collazos, 2008)

2.8.3 Tratamiento secundario

Son principalmente procesos biológicos aerobios, anaerobios y fisicoquímicos (floculación) con una eficiencia de remoción de DBO_5 soluble mayor a 80%, pudiendo ser de biomasa en suspensión o biomasa adherida (Norma OS.090 , 2006). Este proceso reduce o convierte la materia orgánica finamente dividida y/o disuelta, en sólidos sedimentables

floculentos que puedan ser separados por sedimentación en tanques de decantación (Rojas, 2002).

Incluye los siguientes sistemas: lodos activados (incluidas las zanjas de oxidación y otras variantes), sistemas biológicos rotativos de contacto, y biodigestores (Norma OS.090 , 2006).

2.8.3.1 Lodos activados

Conformados por un estanque de clarificación y de aireación; el tratamiento se logra mediante la difusión de aire por medios mecánicos en el interior del estanque; durante el tratamiento los microorganismos forman flóculos de clarificación (figura 6). La finalidad es la oxidación de la materia biodegradable en el estanque de aireación y la floculación que permite la separación de la biomasa nueva del efluente tratado, mediante microorganismos. Dicho tratamiento remueve un 90% de carga orgánica; el inconveniente es que requiere de instalaciones costosas y generan volúmenes altos de lodos (Varila & Díaz, 2008).

Los lodos activados incluyen las zanjas de oxidación, debido a que son adecuados para pequeñas y grandes comunidades y constituyen una forma especial de aeración prolongada con bajos costos de instalación por cuanto no es necesario el uso de decantación primaria y el lodo estabilizado en el proceso puede ser desaguado directamente en lechos de secado. Este tipo de tratamientos es simple de operar y capaz de absorber variaciones bruscas de carga (Norma OS.090 , 2006).



Figura 6. Lodos activados

Fuente: (Limón, 2013)

2.8.3.2 Sistemas biológicos rotativos de contacto

También conocidos como biodiscos, son sistemas de tratamiento en los que los microorganismos responsables de la degradación de la materia orgánica se hallan adheridos a un material de soporte (figura 7) (Chávez, 2010). Dichos módulos están sumergidos hasta un 40% de su diámetro, de modo que al rotar permiten que la biopelícula se ponga en contacto alternadamente con el efluente primario y con el aire. Constan con discos de madera, material plástico o metales ubicados en forma paralela de modo que provean una alta superficie de contacto para el desarrollo de la biopelícula (Norma OS.090 , 2006).

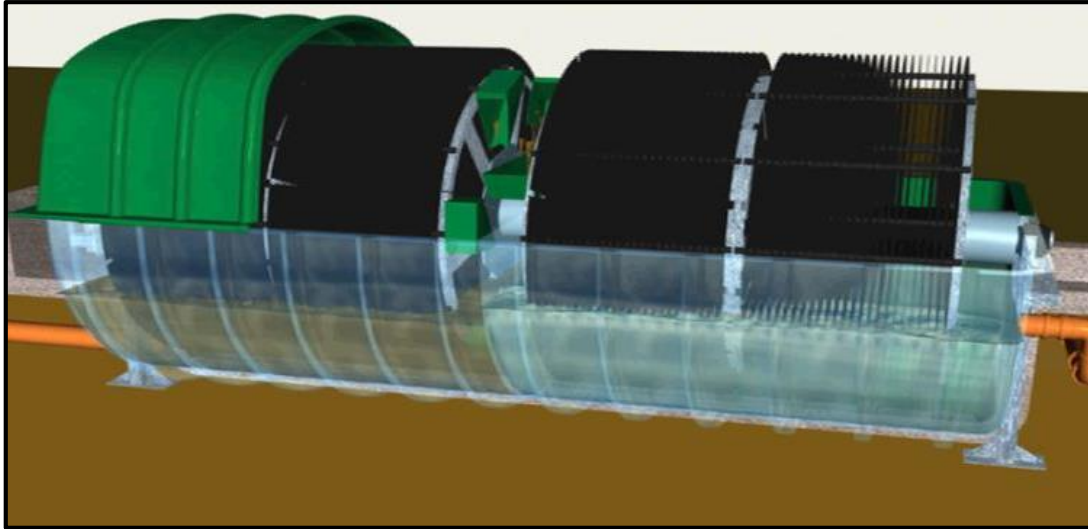


Figura 7. Sistemas biológicos rotativos de contacto

Fuente: (Chávez, 2010)

2.8.3.3 Biodigestores

El biodigestor está formado por un tanque impermeable, donde ocurre el proceso de digestión anaerobia. Además, cuenta con un sistema de dos fases que son: la sedimentación de lodos y la digestión anaerobia, dando como resultado final agua depurada (Martí, 2007). El biodigestor en casos se le puede utilizar como un tratamiento primario al igual que el tanque Séptico y tanque Imhoff, los cuales se encargan de la remoción de los sólidos orgánicos e inorgánicos sedimentables, para disminuir la carga en el tratamiento biológico (Norma OS.090 , 2006).

2.8.3.3.1 Características

El biodigestor cuenta con las siguientes características (Vigil, 2008):

- Son 100% hermético y resistente: no se fisura y confina los excrementos de una forma segura.

- Es autolimpiable, ya que no requiere de bombas ni medios mecánicos para la extracción de lodos, porque con sólo abrir una válvula se extraen los lodos, eliminando costos y molestias de mantenimiento
- Mayor eficiencia en la remoción de constituyentes de las aguas residuales en comparación con sistemas tradicionales como fosas sépticas de concreto y letrinas, las cuales son focos de contaminación al agrietarse las paredes y saturarse.
- Fácil de transportar e instalar

Asimismo, Sánchez (s.f) menciona que:

- No genera olores, permitiendo instalarlo al interior o cerca de la vivienda
- Tiene una vida útil de 35 años
- Adaptable a todo tipo de suelo y terreno
- No se agrieta
- Bajo costo

2.8.3.3.2 Componentes y funcionamiento del biodigestor

El biodigestor cuenta de tres etapas para su funcionamiento que son (Vigil, 2008)

- El agua ingresa por el tubo N° 1 (figura 8) hasta el fondo, donde las bacterias inician la descomposición.
- Luego sube y pasa por el filtro N° 2 (figura 8), donde la materia orgánica que asciende es atrapada por las bacterias fijadas en los anillos de plástico (Aros PETS) del filtro.
- El agua tratada sale por el tubo N° 3 (figura 8) hacia un área de percolación (pozo de absorción o zanja de infiltración) o humedad artificial.

- Las grasas suben a la superficie entre el filtro y el tanque, donde las bacterias las descomponen trastornándolas en gas, líquido o lodo espeso, que desciende al fondo. La materia orgánica que escapa es consumida por las bacterias fijadas en los aros PET del filtro y, una vez tratada, sale por el tubo N° 3 (figura 8).

Asimismo, en la figura 8, se muestra los componentes del biodigestor (Vigil, 2008):

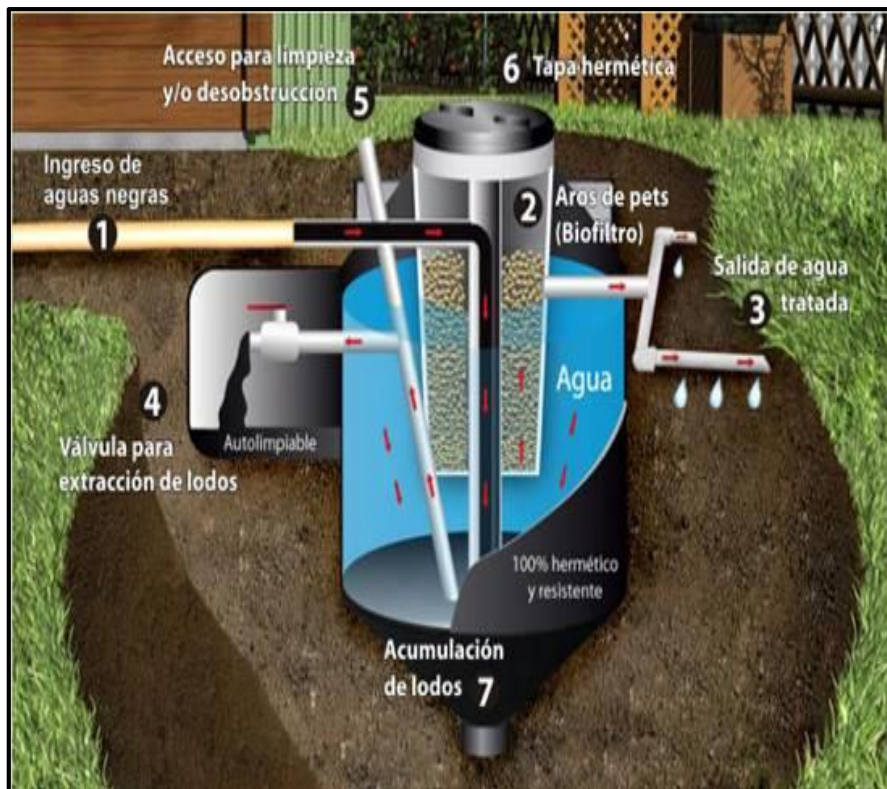


Figura 8. Componentes del biodigestor

Fuente: (Vigil, 2008).

2.8.3.3 Limpieza y mantenimiento del biodigestor

Para realizar la limpieza y mantenimiento del biodigestor se debe tener en cuenta lo siguiente (Vigil, 2008):

- Abriendo la válvula N° 4 (ver figura 8), el lodo alojado en el fondo sale por gravedad a una caja de registro. Primero salen de dos a tres litros de agua de color beige, luego

salen los lodos estabilizados (color café). Se cierra la válvula cuando vuelve a salir agua de color beige. Dependiendo del uso, la extracción de lodos se realiza cada 12 - 24 meses.

- La primera extracción de lodos debe realizarse a los 6 meses de la fecha de inicio de utilización, de forma de estimar el intervalo necesario para la limpieza, de acuerdo con el volumen acumulado en el Biodigestor.
- Si observa que el lodo sale con dificultad, introducir y remover con un palo de escoba en el tubo N° 5 (ver figura 8), (teniendo cuidado de no dañar el tanque).
- En la caja de extracción de lodos, la parte líquida del lodo será absorbida por el suelo, quedando retenida la materia orgánica que después de secar se convierte en polvo negro que puede usarse como fertilizante.
- Se recomienda limpiar los biofiltros anaeróbicos, echando agua con una manguera después de una obstrucción y cada 3 o 4 extracciones de lodos.

De la misma manera explicaremos los sistemas de tratamientos naturales de aguas residuales, las cuales incluyen a los lagunajes o lagunas, cultivos acuáticos y humedales artificiales.

2.8.4 Tratamientos naturales

Son aquellos tratamientos que imitan los fenómenos que ocurren espontáneamente en la naturaleza (Luna & Castañeda, 2014); que se encargan de la eliminación de las sustancias contaminantes de las aguas residuales a través de mecanismos y procesos naturales los cuales no requieren de energía externa ni de aditivos químicos (García & Corzo, 2008). Este tipo de tratamientos incluye a los lagunajes o lagunas, cultivos acuáticos y humedales artificiales.

2.8.4.1 Lagunajes o lagunas

Los lagunajes o lagunas son también conocidas como estanques de estabilización, diseñados para el tratamiento de aguas residuales mediante procesos biológicos naturales de interacción de la biomasa (algas, bacterias, protozoarios, etc.) y la materia orgánica contenida en el agua residual (Espinoza, 2010); se clasifican en anaerobias, aerobias y facultativas (Norma OS.090 , 2006). Consiste en el almacenamiento del agua residual al aire libre en un tiempo variable, dependiendo de la carga de contaminantes y las condiciones climáticas (ver figura 9) (Gonzáles, Bécares, & Luis, 2001); asimismo, presenta efluentes con una concentración mínima de carga de contaminante (nutrientes, microorganismos patógenos y metales pesados), la cual es aceptada para ser utilizada en la agricultura (Fuente, Matute, & Méndez, 2010).

El proceso de depuración en los lagunajes se da mediante los microorganismos, los cuales se encargan de degradar la materia orgánica presente; asimismo se lleva a cabo procesos físicos, químicos y biológicos, como: la sedimentación, oxidación, evapotranspiración, aireación y la fotosíntesis, la cual es llevada a cabo por las microalgas existentes en dichos lagunajes (Fuente et al., 2010).

Los lagunajes presentan costos mínimos, ausencia de elementos electromecánicos y personal de mantenimiento no especializado (Fuente et al., 2010). Pero, necesitan de gran superficie para su construcción, las condiciones ambientales tienen que ser las adecuadas para un buen funcionamiento; los efluentes presentan una gran cantidad de algas (Peralta, Yungan, Ramirez, & Ernesto, 1999); también, presentan olores desagradables, genera presencia de mosquitos, hay poco control sobre el proceso de tratamiento y el agua residual puede evaporarse (Indian Health Service, 2009).



Figura 9. Lagunajes o lagunas

Fuente: (González, Bécares, & Luis, 2001)

2.8.4.2 Cultivos acuáticos

Los cultivos acuáticos son similares a los humedales artificiales, debido a que el agua está en contacto con la atmósfera y trabajan con especies macrófitas flotantes (figura 10) (Celis, Junod, & Sandoval, 2005). El funcionamiento de los sistemas naturales para tratamiento de aguas residuales, se basa en el sembrío de plantas acuáticas en estanques con plantas acuáticas flotantes y oxigenadoras (CEADU, 2006).

Las macrófitas flotantes más destacadas son (Ly, 2007):

Eichhornia crassipes (Jacinto de Agua)



Pistia stratiotes (Lechuga de Agua)



Hydrocharis morsusranae (Mordisco de Rana)



Salvinia auriculata (Oreja de Elefante)



Lemna Minor (Lenteja de agua)



Stratiotes Alcides (Pita de Agua)



Nymphaea alba (Nenúfar)



Nymphoides peltata (Ninfolides)



Nelumbo nucifera (Loto, Nelumbo)



Nymphoides indica (Ninfolides)



Nuphar lutea (Nenúfar Amarillo)



Nymphaea hortorum (Nenúfar)



Las especies oxigenadoras permanecen completamente sumergidas excepto las flores, que pueden salir a la superficie, su principal función es que la absorción de los minerales y dióxido de carbono por medio de sus hojas, lo cual dificulta el desarrollo de algas. Su crecimiento es demasiado rápido por lo que es recomendable colocar una planta oxigenadora cada 0.3 m² de la superficie del estanque (Valero, 2006). Las cuales son:

Callitriche (Bricio)



Myriophyllum verticillatum

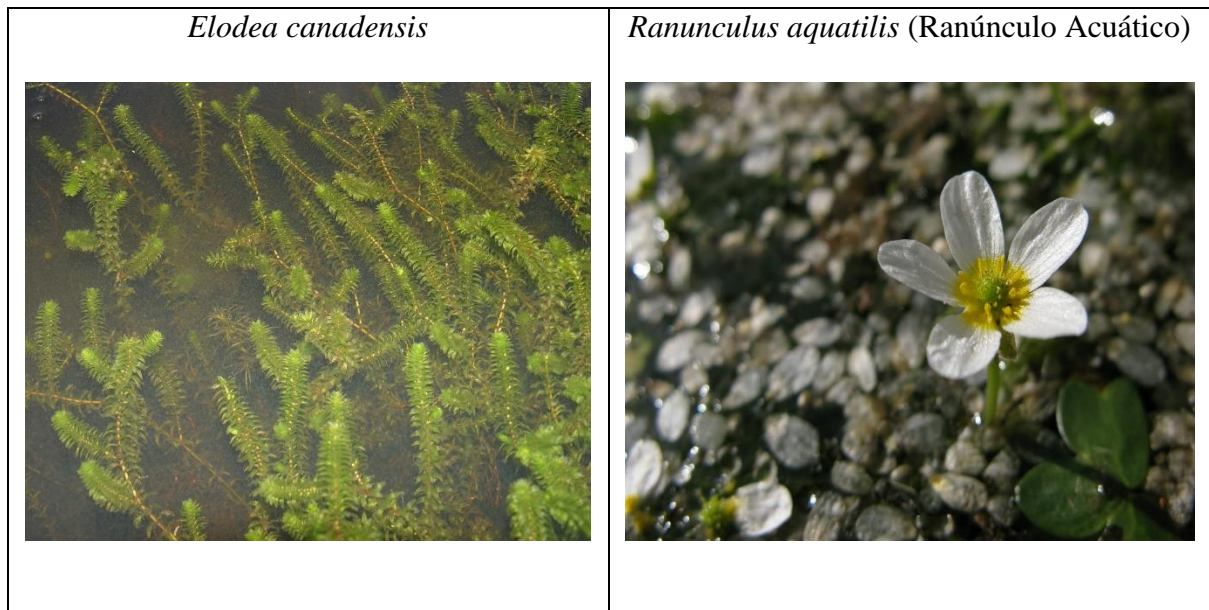


Ceratophyllum demersum



Valisneria spp





El proceso de depuración que cumple estas especies son mediante tres mecanismos: la filtración y sedimentación de sólidos; la incorporación de nutrientes en las plantas; y la degradación de la materia orgánica por los microorganismos (Demirezen & Akbulut, 2011).

Las funciones que cumplen las macrófitas acuáticas flotantes en los sistemas de tratamiento son: airear el sistema radicular y facilitar oxígeno a los microorganismos que viven en la rizósfera; absorción de nutrientes (nitrógeno y fósforo) (Mortelo & Lara, 2012); eliminación de contaminantes asimilándolos directamente en sus tejidos y la filtración de los sólidos a través del entramado que forma su sistema radicular (García, 2012)

Las ventajas, que tiene este tipo de tratamientos es que son bajos en costos, operación y mantenimiento, y no requiere de personal altamente calificado (Indian Health Service, 2009). En cambio, las desventajas de ese tipo de tratamiento es que generan la atracción de mosquitos, existen muchas larvas de insectos y utilizan sistemas complementarios de aireación (León & Lucero, 2009).



Figura Ilustración 10. Cultivos acuáticos

Fuente: (Arroyave, 2004)

2.8.4.3 Humedales artificiales o construidos

2.8.4.3.1 Historia

Los estudios sobre Humedales Artificiales (HA) para tratamiento de aguas residuales, lo inicio la Doctora Kathe Seidel en 1950 en el Instituto de Max Planck en Alemania, pero en el año 1966 realiza un experimentó utilizando la especie junco común (*Schoenoplectus lacustris*), en donde determinó una serie de remoción de contaminantes, tanto orgánicos como inorgánicos, así como la desaparición de bacterias como la Salmonella, Coliformes y Enterococos, presentes en el agua residual (Llagas & Guadalupe, 2006).

El primer estudio de un humedal construido de flujo subsuperficial horizontal a escala real se realizó en 1974 en Wolverton, Mississippi, donde se obtuvieron resultados favorables de un 60% a 70% de remoción de contaminantes (Hadad et al., 2008).

El desarrollo de esta tecnología fue también de interés para la NASA la cual desarrollo su propio sistema, y lo llamo Sistema de Tratamiento Híbrido, debido a que utilizaron

microorganismos anaerobios y plantas emergentes como el “*Phragmites communis*”, donde obtuvieron resultados de 50% con respecto a la carga de contaminantes (Silva, 2008).

Siendo así, que los humedales artificiales producen efluentes de buena calidad, al mismo tiempo presentan bajos costos de inversión, operación y mantenimiento (Asuman, 2003), y lo más importante es que no requieren de personal altamente capacitado, debido a su facilidad de operar (Karathanasis, Potter, & Coyne, 2003).

También, son aplicables para poblaciones pequeñas, principalmente a las comunidades donde los recursos económicos son bajos, y las tecnologías aplicadas no necesitan un profesional para ser manipuladas, las cuales son réplicas de la naturaleza (Delgadillo et al., 2010). Es por ello que se han logrado la construcción de 200 sistemas en Norteamérica y 500 en Europa, debido a su eficiencia de remoción (Arias & Brix, 2003).

2.8.4.3.2 Definición de los humedales artificiales o construidos

Los humedales artificiales son áreas que se encuentran inundados o saturados de agua con una profundidad menor a 60 cm, adicionalmente tiene unos 15 cm de borde libre para la acumulación del agua (Von Münch, 2009); con una frecuencia, duración o profundidad suficiente para mantener especies de plantas predominantes, adaptadas a crecer en suelos saturados, con un lecho rocoso (gravas y arena), con una vegetación emergente como: espadañas, carrizos y juncos, que aprovechan las interacciones con los microorganismos y la atmósfera para remover la materia orgánica (Arias & Brix, 2003).

Las funciones que cumplen las macrófitas emergentes son: airear el sistema radicular y facilitar oxígeno a los microorganismos que viven en la rizósfera; absorción de nutrientes (nitrógeno y fósforo) (Mortelo & Lara, 2012); eliminación de contaminantes asimilándolos

directamente en sus tejidos y la filtración de los sólidos a través del entramado que forma su sistema radicular (García, 2012)

Dichos humedales ofrecen servicios ecosistémicos tales como la regulación del ciclo hídrico, la retención de sedimentos, la estabilización microclimática, la regulación de ciclos de nutrientes, la productividad biológica, así como también la captura de gases de efecto invernadero (GEI) (Rivas & Paredes, 2014), y que reducen la contaminación en general de más de 20% que en los humedales naturales (Stearman, 2003).

También, son una imitación de los humedales naturales (Hoffmann, Plastzer, Winker, & Muench, 2011), pero son más capaces de hacer frente a los problemas con la alta variación estacional, debido a que se pueden manipular (Isoaari, Hermanowicz, & Rubin, 2010).

Asimismo, son tecnologías sostenibles de tratamiento de aguas residuales domésticas, industriales, municipales y lixiviados de vertederos (Vymazal, & Kropfelova, 2009). Son simples de operar, con baja producción de lodos residuales y sin consumo energético, y lo más importante es que no requieren de la adición de reactivos químicos y de energía para airear el agua o recircularla (Zarela & García, 2012). Además, están diseñados para el tratamiento secundario o terciario de las aguas residuales (Ohio, 2006).

La United States Environmental Protection Agency (1993) define que un humedal artificial se construye con el propósito de controlar la contaminación de los cuerpos receptores con una composición bien definida del sustrato, el tipo de vegetación, y el patrón de flujo; siempre teniendo en cuenta la gestión de residuos. Asimismo, los humedales artificiales son capaces de tolerar volúmenes variables de agua residuales y diferentes niveles de contaminantes (Hua, Kamil, Shutes, Chye, & Mansor, 2007).

Los humedales artificiales ofrecen ventajas adicionales en comparación con los humedales naturales, incluyen la selección del sitio, los materiales y mano de obra son locales (fácil accesibilidad) (Kadlec & Wallace, 2009); y lo más importante, es que se tiene el control sobre las vías hidráulicas y tiempo de retención (Arivoli & Mohanraj, 2013).

La infraestructura necesaria para su construcción es muy simple y asequible, su mantenimiento es relativamente fácil y económico (Fazlolahi & Eslamian, 2014). Es una tecnología muy adecuada para ser aplicada en proyectos de cooperación dado que no genera dependencia tecnológica (Lohora, 2001).

Arias, Betancur, Salazar, & Hernández (2010) mencionan que los humedales artificiales tienen el propósito de reducir la carga de contaminantes (DBO₅, DQO, nitrógeno, fósforo, pH y turbidez); los cuales son dados mediante procesos, físicos y biológicos, presentes en las aguas residuales (Kyambadde, Kansiime, & Dalhammar, 2005).

Un problema principal que puede ocurrir en los humedales artificiales es la obstrucción del medio granular por parte de las partículas que se encuentran en la carga de contaminantes (García, Rousseau, Morató, Lesage, Matamoros & Bayona, 2012). Además, requieren de áreas grandes para la construcción (Vymazal, 2009).

2.8.4.3.3 Características de los humedales artificiales

Las características que presentan los humedales artificiales son los siguientes (MINAQUA, 2013):

- Filtración a través de medios porosos (arena y grava) y de sistemas de raíces y tallos subterráneos.

- Precipitación de compuestos insolubles o coprecipitación con compuestos insolubles (nitrógeno, fósforo)
- Oxidación y reducción de materia orgánica, compuestos nitrogenados y metales.
- Desinfección natural a través de la radiación UV obtenido del sol

Asimismo, Seoánez (2005) menciona que los humedales artificiales constan de:

- Vegetación implantada
- Especies emergentes elegidas según el tipo y función del humedal.
- Crecimiento de microorganismos
- Gestión de sustrato (limpieza)

2.8.4.3.4 Componentes de los humedales artificiales

2.8.4.3.4.1 Agua residual

Es un elemento indispensable para que se puede dar el proceso de depuración en el humedal artificial, dicha agua contiene gran cantidad de materia orgánica (Luna & Castañeda, 2014) (ver figura 11).

2.8.4.3.4.2 Plantas

Las plantas pueden ser emergentes, flotantes y sumergidas, estas permiten que se establezca la película microbiana, por medio de las raíces inyectan aire al soporte y a la fase acuosa (Frers, 2008); esto origina que existan, dentro del humedal, secciones aerobias y anaerobias favoreciendo así la existencia de una mayor variedad de microorganismos (Burciaga, 2008) (ver figura 11).

2.8.4.3.4.3 *Microorganismos*

Los microorganismos e invertebrados acuáticos se desarrollan de manera natural (Luna & Castañeda, 2014); los cuales se encargan de transformar las sustancias orgánicas e inorgánicas en sustancias inocuas o insolubles, alterar las condiciones de potencial redox del sustrato y así afecta la capacidad de proceso del humedal; asimismo, estos microorganismos se ajustan a los cambios en el agua que les llega y se pueden extender rápidamente cuando se tiene la suficiente energía, pero no soportan elevadas concentraciones de sustancias tóxicas como: pesticidas y metales pesados (Lara, 1999) (ver figura 11).

2.8.4.3.4.4 *Lecho filtrante o medio de soporte*

El lecho filtrante o medio de soporte está compuesto por grava de diferentes diámetros, arena y cascajo de piedra, encargados del crecimiento de vegetación emergente (Peña, Van Ginneken & Madera, 2003). El cual está encargado de retener los sólidos disueltos totales y los Coliformes totales y fecales, los cuales cuentan con una profundidad de 0.4 a 0.6 m. asimismo, se debe evitar compactar el lecho, ya que esto alterara la conductividad hidráulica del mismo (Luna & Castañeda, 2014) (ver figura 11).

2.8.4.3.5 *Funciones de los humedales artificiales (HA)*

Los HA fundamentan su funcionamiento en la actividad bioquímica de los microorganismos; el aporte de oxígeno proveniente del componente vegetal en interacción con el material filtrante, el cual funciona como soporte tanto para los microorganismos como para el componente vegetal (ver figura 11). En conjunto, estos elementos, eliminan materiales disueltos y suspendidos en el agua residual y biodegradan los materiales orgánicos hasta mineralizarlos (Luna & Castañeda, 2014).

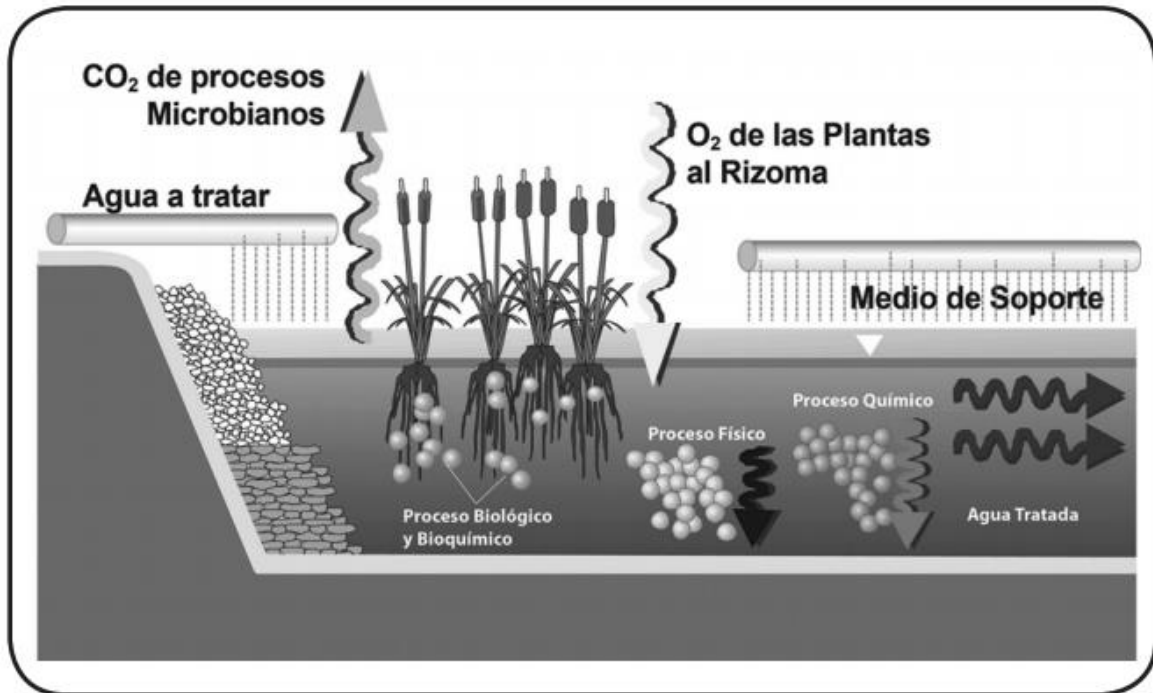


Figura 11. Procesos físicos, biológicos y químicos; así como los componentes de los HA

Fuente: (Luna & Castañeda, 2014)

Dichas funciones o procesos son 3, los cuales se explican a continuación:

2.8.4.3.5.1 *Proceso de remoción físico*

Los humedales artificiales son capaces de proporcionar una alta eficiencia física en la remoción de contaminantes asociados con el material particulado (Erbanová, Palarčík, Slezák, & Mikulášek, 2012). El agua residual se mueve muy lentamente a través del lecho filtrante, debido al flujo laminar característico y la resistencia proporcionada por las raíces de las plantas macrófitas emergentes. La sedimentación de los sólidos suspendidos se da por la baja velocidad del agua residual doméstica (Llagas & Guadalupe, 2006).

Las raíces de las plantas se encargan de la remoción de los sólidos suspendidos para limitar la resuspensión del material particulado, además, sirven como trampa de sedimentos.

La eficiencia de remoción de sólidos suspendidos es proporcional a la velocidad del material particulado fijo y la longitud de los humedales artificiales. (Asto, Bellota, & Herrera, 2009).

La resuspensión podría ocurrir cuando la velocidad de flujo es alta en los HA, producto de la turbulencia de la dirección del viento, bioturbación (perturbación por animales y humanos) y desprendimiento de gas (producto de la fotosíntesis del agua, metano y dióxido de carbono, producido por los microorganismos durante la descomposición de la materia orgánica) (Asto, Bellota, & Herrera, 2009).

Eliminación del fósforo

Los mecanismos de eliminación del fósforo pueden ser de tipo biótico y abiótico. Los bióticos incluye la asimilación por parte de las plantas y los microorganismos, debido a que la cosecha de las plantas no se realiza o no se hace cada cierto tiempo, ocurre que gran cantidad de las plantas mueren lo que hace que gran parte del fósforo sea devuelto al agua por lo que la remoción es baja. Y los abióticos que se basan en la adsorción por el medio granular. La capacidad de adsorción depende de la presencia de hierro, aluminio o calcio en el suelo, así como de la presencia de minerales de arcilla o materia orgánica. Bajo condiciones aerobias y pH entre neutro y ácido el Fe^{+3} se une al fosfato para formar un complejo estable; sin embargo, si el suelo se vuelve anaerobio como resultado de estar inundado, el Fe^{+3} (ion férrico, tiene una fuerte tendencia de capturar iones) se reducirá a Fe^{+2} (ion ferroso) lo cual conduce a que la adsorción sea menos fuerte y se libere fosfato (García & Corzo, 2008)

La adsorción está sujeta a la saturación, considerándose que cada suelo tiene una capacidad de adsorción limitada y luego de que estos sitios estén ocupados no ocurrirán nuevas adsorciones (Kowalik, Obarska, & Poland, 1998).

Otra forma de remoción de fósforo es mediante la acumulación y almacenamiento en la materia orgánica (Kowalik, Obarska, & Poland, 1998).

2.8.4.3.5.2 *Proceso de remoción biológico*

Las plantas emergentes son las responsables de la remoción de los contaminantes como: nitrato, amonio, fosfato e incluso metales pesados como: cadmio y plomo, donde alguno de ellos son esenciales para las plantas (Asto, Bellota, & Herrera, 2009).

La velocidad de remoción de los contaminantes depende de la velocidad de crecimiento y concentración del contaminante en el tejido de las plantas macrófitas emergentes (Llagas & Guadalupe, 2006).

Las plantas almacenan alimento, pero los microorganismos pueden proveer, captar y almacenar nutrientes, a corto plazo. Además, la lixiviación de contaminantes solubles en agua ocurre por la muerte de la planta. Los descompuestos microbianos, sobre todo bacterias del lecho filtrante, utilizan el carbono (C) de la materia orgánica como fuente de energía, convirtiéndola a gases de bióxido de carbono (CO₂) o metano (CH₄) (Llagas & Guadalupe, 2006).

La acumulación de carbono en suelos de humedales

La acumulación neta de C en los humedales resulta de la productividad primaria y la deposición o acumulación de sustancias orgánicas alóctonas (invasoras), menos la descomposición de materia orgánica en el suelo. Este balance, determina si un humedal actúa como fuente de gases invernadero o como trampa de C. La acumulación de C en los humedales se realiza en 2 compartimentos principales: en la biomasa vegetal y los suelos (Hernández, 2010).

La productividad en los humedales es influenciada por las condiciones climáticas, las especies vegetales, la disponibilidad de nutrientes y el hidroperíodo (Mitsch & Gosselink, 2000). Los humedales pueden ser considerados como sumideros de CO₂, ya que este gas es tomado de la atmósfera y convertido a C orgánico por las plantas a través del proceso de la fotosíntesis (Hernández, 2010). Inicialmente se lleva a cabo la hidrólisis de compuestos de cadena larga como los lípidos, las proteínas y los carbohidratos presentes en el material vegetal. Posteriormente, dependiendo de las condiciones de óxido-reducción, los productos del hidrólisis pueden seguir diferentes rutas metabólicas. Si se encuentran en zonas aerobias, ellos pueden ser oxidados a CO₂ (dióxido de carbono) y H₂O (agua) utilizando el oxígeno como último aceptor de electrones. Por otro lado, si los compuestos orgánicos se encuentran en zonas anaerobias, los microorganismos utilizan la glucosa para obtener energía química produciendo ácidos orgánicos de bajo peso molecular como el acetato, propionato y butirato, los cuales serán convertidos a CO₂, utilizando aceptores de electrones como NO₃⁻, Mn⁴⁺, Fe³⁺ y SO₄²⁻ (Hernández, 2010).

En el caso de los suelos de humedales, los promedios de descomposición de material orgánico suelen ser bajos por las condiciones anaerobias, por lo que su potencial de almacenamiento de C es alto (Collins & Kuehl, 2000). La formación de turba en los humedales representa el sumidero de C en estos ecosistemas. La turba se define como suelo sin consolidar formado por materia vegetal fibrosa parcialmente descompuesto que se acumula en un ambiente anegado (figura 12) (Mitsch & Gosselink, 2000). La acumulación de turba ocurre cuando la producción primaria en la superficie excede las pérdidas por descomposición y lixiviados, resultando una acreación (creación de un cuerpo agregado) vertical o lateral de depósitos de material orgánico (Turetsky, Manning, & Wieder, 2004).

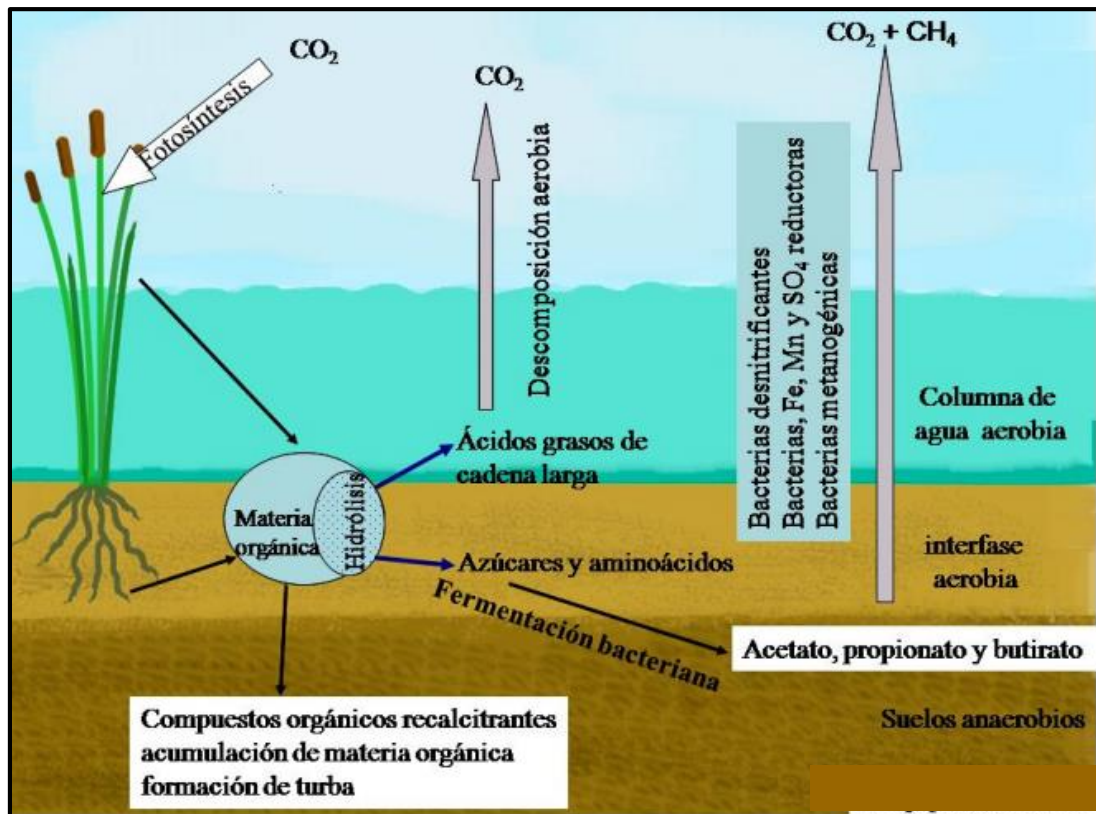


Figura 12. Ciclo del carbono en los HA

Fuente: (Hernández, 2010).

Emisiones de metano (CH_4) en los humedales

Las fuentes de CH_4 atmosférico son principalmente de origen biológico (70-80%) y los humedales son considerados como importantes fuentes emisoras de este gas, contribuyendo con el 40-55% de las emisiones anuales globales (Boon & Lee, 1997).

En la descomposición del material vegetal en los humedales intervienen los factores ambientales como el tipo de comunidad microbológica dominante en el humedal, la concentración de nutrientes en el agua y sedimento, la temperatura, la concentración de oxígeno disuelto, el pH, la profundidad y las características del sedimento (Ribeiro, Álvarez, Riobos, & Cirujano, 2004).

La oxidación de metano, ocurre en presencia moderada de oxígeno (oxidación aerobia) y en ausencia de oxígeno (oxidación anaerobia) (figura 13). La primera, se produce por bacterias de los géneros *Methylococcus*, *Methylomonas* y por las bacterias nitrificantes, como *Nitrosomonas europaea* y *Nitrosococcus oceanus* (Jones & Morita, 1983). Las bacterias que oxidan el CH₄ son llamadas bacterias metanotróficas y son abundantes en la columna de agua, en la interface aeróbica del sedimento y agua, así como en la zona de la rizósfera (Hernández, 2010).

El transporte de metano a la atmósfera ocurre mediante 3 mecanismos a) difusión pasiva a través de las plantas, conocido como ventilación, b) difusión a través del agua y c) ebullición o formación de burbujas (figura 13) (Laing, Shreeve, & Pearce, 2008). El transporte de CH₄ por las plantas es a través de la aerénquima que son espacios vacíos que las hidrófitas poseen para transportar oxígeno de la hojas a la raíz (Altor & Mistch, 2006) La difusión del CH₄ a través del agua es muy lenta debida a su baja solubilidad (Laing et al., 2006). La ebullición se refiere al paso de burbujas de CH₄ por la columna de agua sin disolverse en ella. Se ha observado que este último fenómeno es un importante mecanismo de transporte del CH₄ a la atmósfera (Hernández, 2010).

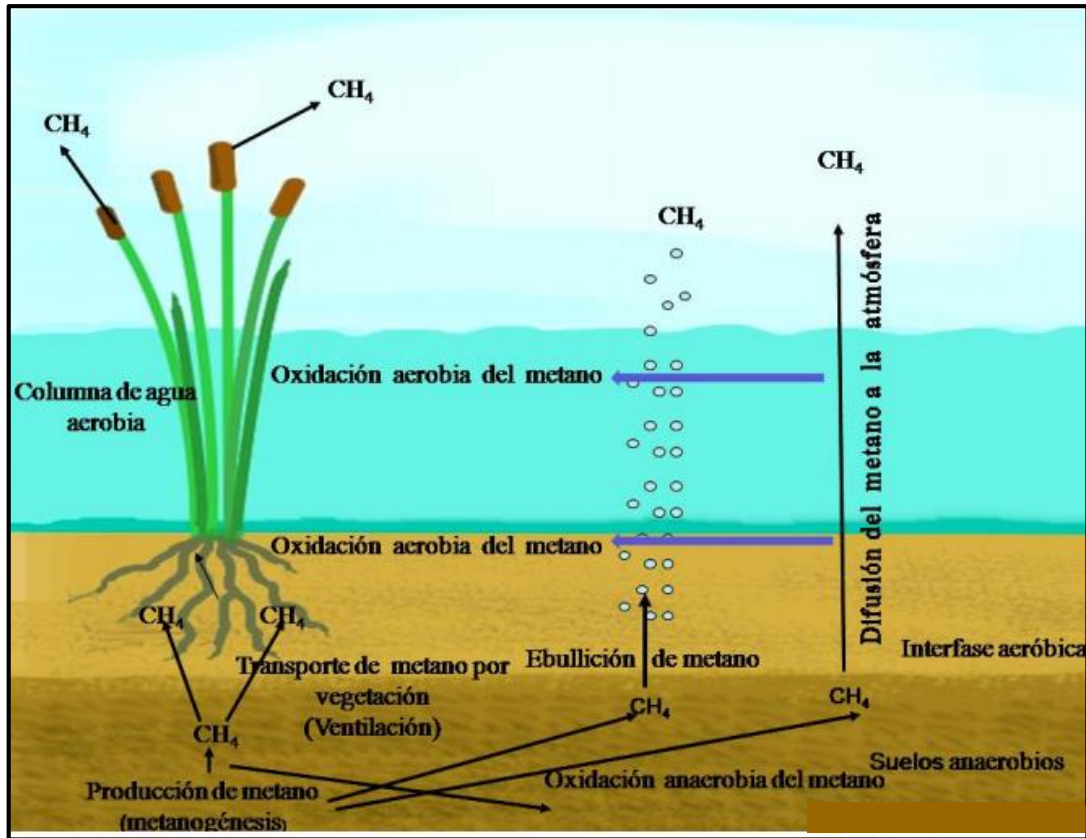


Figura 13. Producción, oxidación y transporte a la atmósfera de metano en los HA

Fuente: (Hernández, 2010).

Ciclo del nitrógeno

Los mecanismos de remoción de nitrógeno incluyen: la nitrificación, desnitrificación, la incorporación a tejidos vegetales, los procesos de Anamox- oxidación de amonio anaeróbico (anaerobic ammonia oxidation), y la mineralización de nitrógeno orgánico (Plaza de los Reyes, Vera, Salvato, Borin, & Vidal, 2011).

a) Nitrificación

El proceso de nitrificación se efectúa en dos etapas: la primera etapa es la oxidación del amonio a nitrito, dicho proceso es llevado a cabo, fundamentalmente, por bacterias nitrificantes del género *Nitrosomonas*; la oxidación posterior de nitrito a nitrato la realiza

las bacterias del género *Nitrobacter*. La nitrificación solo ocurre bajo condiciones aerobias (presencia de oxígeno) (figura 14) (García & Corzo, 2008).

Otro factor importante para que exista nitrificación es que exista suficiente alcalinidad, temperatura adecuada y concentración de materia orgánica por debajo de 20 mg/l (Brix, 1993).

La nitrificación requiere de 4,6 mg de oxígeno por cada miligramo de amonio (expresado como nitrógeno). En los humedales construidos la cantidad de oxígeno utilizable está relacionado con la re aireación atmosférica para los humedales de flujo libre, en cambio para los humedales de flujo subsuperficial tiene que existir una extensión en la penetración y la eficiencia en la transferencia del oxígeno por las raíces de las plantas (Brix, 1993).

Las bacterias nitrificantes sintetizan la enzima amonio monoxigenasa (AMO) que también oxida al CH₄, ya que éste funciona como un sustrato alternativo a la enzima en una forma análoga a la oxidación de amonio. Sin embargo, la afinidad del CH₄ por la enzima AMO es menor que por la enzima MMO (Jones & Morita, 1983). La oxidación anaerobia, se realiza principalmente en los humedales con agua salobre por varios grupos de *Archaea*, en la zona de transición de reducción de sulfato y metanogénesis (Torres, Ramírez, Fernández, & Barriga, 2005).

La eliminación del nitrógeno vía nitrificación se encuentra en un rango de 60-90% en comparación del 1-34% eliminado vía asimilación (Plaza de los Reyes, Vera, Salvato, Borin, & Vidal, 2011).

b) Desnitrificación

Es un proceso de descomposición anaerobia en el que la materia orgánica es degradada por bacterias que utilizan como aceptor final de electrones al nitrato, en lugar de oxígeno (respiración anaerobia) (figura 14) (Brix, 1993).

La desnitrificación permite eliminar el nitrato (NO_3^-) reducido a óxido nitroso (N_2O) y convertirlo en nitrógeno gas (N_2), vía intermediario el nitrito (NO_2) y el óxido nitroso (N_2O), donde posteriormente el nitrógeno se pierde en la atmósfera (Benefield & Randall, 1980). Esta reacción sólo ocurre en condiciones de anóxia y en presencia de materia orgánica, ya que es realizada por bacterias heterotróficas. Siendo que el pH también influye, ya que debe estar por encima de 6 para que el mayor porcentaje de nitrógeno gas sea liberado (Brix, 1993).

La mayor fuente de materia orgánica utilizada en los humedales para la desnitrificación son los detritos (descomposición de una masa sólida en partículas) de plantas y otras fuentes naturales presentes en la capa bentónica, es por esto que generalmente los sistemas con flujo libre son más eficientes que los sistemas con flujo subsuperficial en la remoción de nitrógeno (García & Corzo, 2008).

En la desnitrificación se usan nitratos como aceptores de electrones para la oxidación de la materia orgánica cuando el potencial redox es de 450 mV. Cuando el nitrato se agota, ocurre la reducción de Mn^{+4} a 400 mV, seguido por la reducción de Fe^{3+} a 180 mV. Esas reacciones son llevadas a cabo por bacterias que usan la fermentación para la obtención de energía. Los anaerobios obligados reducen el sulfato cuando el potencial redox baja a -215 mV y el CH_4 se empieza a producir en cuanto el potencial redox es menor a -244 mV (Neue, Gaunt, Wang, & Becker-Heidmann, 1997).

c) Incorporación a tejidos vegetales (asimilación)

La asimilación de nitrógeno se refiere a una variedad de procesos biológicos que convierten formas de nitrógeno inorgánicas en compuestos orgánicos que sirven como componentes básicos para células y tejidos (Plaza de los Reyes, Vera, Salvato, Borin, & Vidal, 2011).

Las plantas pueden eliminar nitrógeno mediante la asimilación de amonio o nitrato (figura 14). Además del crecimiento de células vegetales, el amonio puede ser transformado fácilmente en aminoácidos por una amplia gama de microorganismos, tanto heterótrofos como autótrofos (Plaza de los Reyes et al., 2011). El nitrógeno asimilado es incorporado a la biomasa y por tanto eliminado del agua. Al morir las partes aéreas de las plantas, durante su senescencia anual, el nitrógeno puede retornar al humedal, por ello se recomienda podar la vegetación justo antes de la senescencia (vejez) (García & Corzo, 2008).

d) Anamox

Existen pruebas concretas de la eliminación de nitrito vía amonio, también conocida como oxidación de amonio anaeróbico, por sus siglas en inglés (anaerobic ammonia oxidation). Se trata de un proceso autotrófico, por lo que no posee requerimientos de carbono, en el que las bacterias convierten el nitrito y el amonio en nitrógeno gaseoso (N_2). Es estrictamente anaeróbico y es realizado por bacterias del orden *Planctomycetes* (figura 14) (Sasikala, Tanaka, Wah Wah, & Jinadasa, 2009).

e) Mineralización de nitrógeno orgánico

En un humedal, algunas fracciones del nitrógeno orgánico incorporado al detrito tarde o temprano pueden estar no disponibles para el ciclo adicional por procesos de enterramiento (Tanner, 1996).

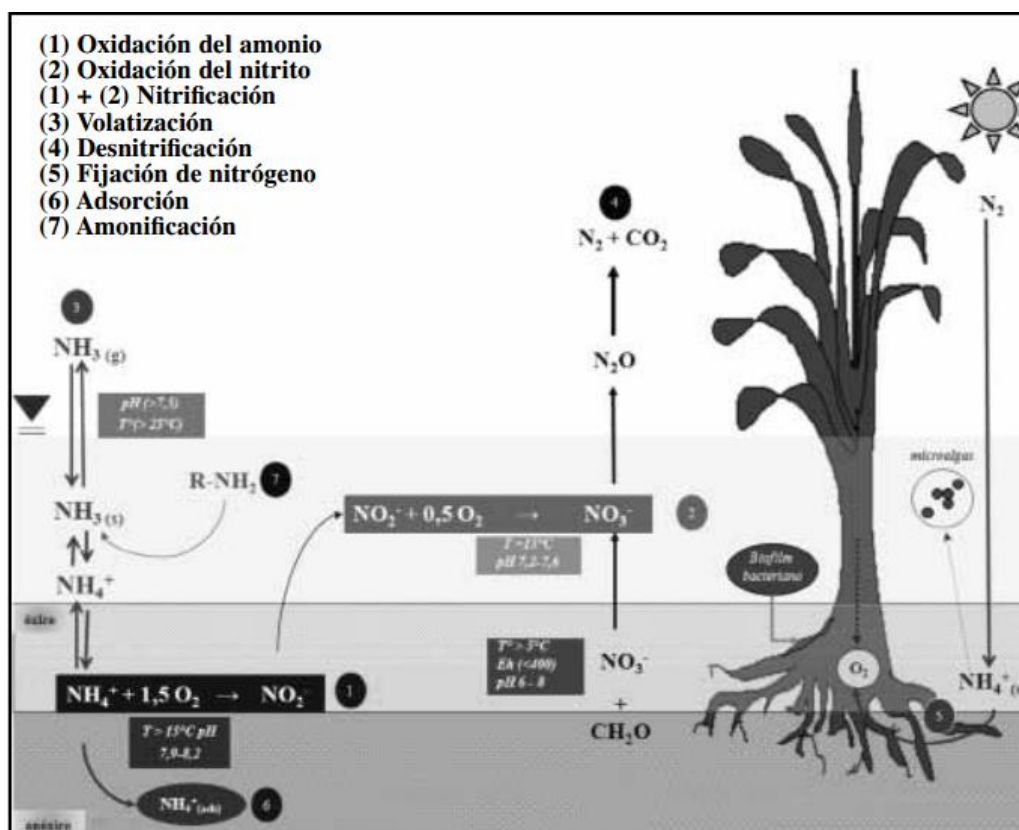


Figura Ilustración 14. Ciclo del nitrógeno en los HA

Fuente: (Plaza de los Reyes et al., 2011).

2.8.4.3.5.3 Proceso de remoción química

En este proceso actúa el tipo de suelo en los humedales artificiales para la absorción, que da lugar a la retención de corto plazo o a la inmovilización a largo plazo de varias clases de contaminantes (Hoffman, 2013).

El intercambio iónico es la transferencia de los iones (moléculas con cargas positivas o negativas) a partir de la fase de la solución (agua) a la fase sólida (suelo), asimismo, da lugar a la retención a corto plazo o a la inmovilización a largo plazo de varias clases de contaminantes (Orozco, 2010); en cambio la adsorción se refiere a la unión de iones a las partículas del suelo, por intercambio catiónico o absorción química (Asto, Bellota, & Herrera, 2009). El amonio puede ser adsorbido desde la columna de agua por una reacción de intercambio catiónico, donde el ion amonio (NH_4^+) es adsorbido como un ión intercambiable por arcillas, químicamente sorbido por sustancias húmicas o fijado dentro de las porosidades de la arcilla, pudiendo estas reacciones ocurrir simultáneamente. Estos procesos se hallan influenciados bajo diversos factores como la naturaleza y la cantidad de arcillas, los periodos inundados y secos, la naturaleza y la cantidad de materia orgánica en suelo, el periodo de saturación, la presencia de vegetación y la edad del humedal (Savant & De Datta, 1982).

El intercambio catiónico implica la unión física de los cationes (iones positivamente cargados) a las superficies de las partículas de la arcilla y de la materia orgánica en el suelo; esto es una unión mucho más débil que la unión química, por lo tanto, los cationes no se inmovilizan permanentemente en el suelo (Llagas & Guadalupe, 2006).

En cambio la volatilización implica la difusión de un compuesto disuelto desde el agua en la atmósfera, en donde la volatilización del amoníaco (NH_4^+) (Benefield & Randall, 1980). La pérdida de amonio (NH_4^+) por volatilización a la atmósfera es un proceso complejo mediado por la combinación de factores físicos, químicos, y biológicos. El intercambio de amoníaco entre la columna de agua, suelo y la atmósfera juega un rol importante en el ciclo de nitrógeno en un humedal. La conversión entre amoníaco e iones amonio depende estrechamente de factores como el pH y la temperatura. A valores bajos de pH y temperatura, la conversión disminuye significativamente (Plaza de los Reyes et al., 2011). Las pérdidas de nitrato por

volatilización en suelos inundados y sedimentos no son significativos con pH menores a 7,5. En cambio, con un pH de 9,5 y temperatura de 30°C, el porcentaje del amonio total presente en su forma no ionizada aumenta un 75% (Reddy & Patrick, 1984).

Dentro de los factores biológicos que influyen en el proceso de volatilización de amonio en humedades se encuentran los efectos de la respiración total microbiana y la fotosíntesis de microalgas, que generan altos valores de pH durante el día (Bodelier & Laanbroek, 2004).

En los humedales artificiales el oxígeno se transfiere con mayor rapidez hacia el agua, a pesar de que están bajo un régimen inundado donde el oxígeno se difunde unos pocos milímetros en la superficie del agua, existen plantas fotosintéticas que aportan oxígeno al suelo y a demás transportan oxígeno de la atmósfera alterando las condiciones de redox (Fenoglio, Genescá, & Durán, 2002). Pero en ambientes con potenciales oxidantes óxido-reducción (Eh) positivo la materia tiende a oxidarse y a descomponerse y en ambientes reductores ésta tiende a reducirse (Fenoglio, Genescá, & Durán, 2001).

Las plantas macrófitas del humedal tienen un efecto importante en la variación de los potenciales al contribuir a la oxigenación de la zona radicular durante el día, la disminución del oxígeno en los humedales se detecta por el incremento del óxido-reducción (Eh) negativos entre un electrodo de platino y un electrodo de calomel o calomelanos (Fenoglio, Genescá, & Durán, 2001).

2.8.4.3.6 Tipos de humedales artificiales o construidos

Existen dos tipos de humedales artificiales y son:

2.8.4.3.6.1 Humedales artificiales de flujo libre o superficial (HAFLS)

En este tipo de sistemas, consta de una capa de agua no muy profunda de unos 30 cm aunque puede llegar a 1 m, el agua siempre se mantiene por arriba del material de soporte continuamente y la aplicación del agua residual en forma continua (Padrón, 2005). Trabajan a condiciones aerobias al estar el agua directamente expuesta a la atmósfera (Sierra & López, 2013); donde puede llegar a presentarse alguna formación de hielo en épocas de invierno (Lara, 1999).

En los humedales artificiales de flujo libre o superficial el agua fluye de manera descendente y percola en el humedal, donde el agua se vierte y se distribuye en toda la superficie del lecho y percola en el lecho, entre las diferentes capas del material filtrante de relleno (Arias & Brix, 2003). El agua circula preferentemente a través de los tallos de las plantas y está expuesta directamente a la atmósfera. Este tipo de humedales es una modificación al sistema de lagunas convencionales (Delgadillo et al., 2010).

Los humedales artificiales de flujo libre o superficial consisten típicamente de estanques o canales con paredes ataludadas, con alguna clase de barrera subterránea para prevenir la filtración, suelo u otro medio conveniente a fin de soportar la vegetación emergente, y agua en una profundidad relativamente baja (0,1 a 0,6 m) que atraviesa la unidad; en estos sistemas el sustrato en que están enraizadas las plantas tiene una baja conductividad hidráulica y no permite un flujo significativo a través de la zona radicular (Llagas & Guadalupe, 2006).

Estos sistemas suelen ser muy variados en su forma y en su hábitat, pueden tener plantas que flotan libremente, plantas de hojas flotantes y plantas con sus raíces extendidas a lo largo de la columna de agua (como el *Jacinto acuático* y *Eichhornia crassipes*) o plantas con poca o ninguna raíz (como *Lemna* y *Spirodella*, *Wolffia sp.*) (Figura 15) (Wetzel, 1993).

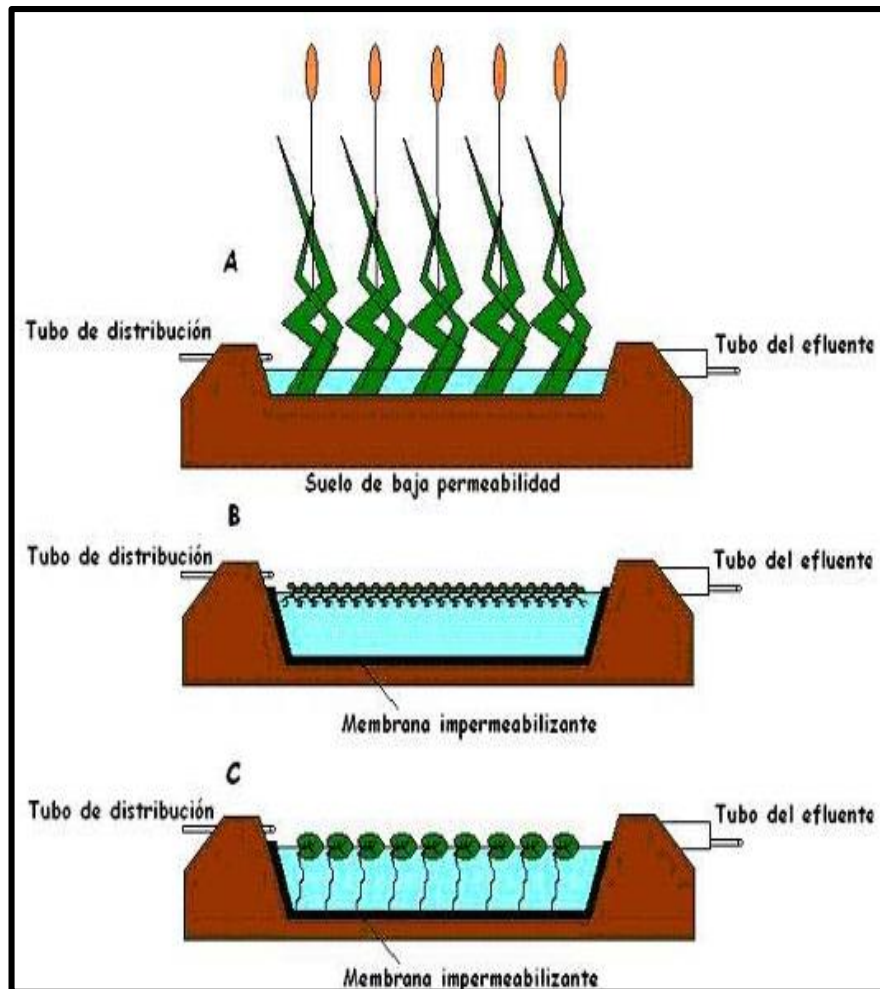


Figura 15. HA de flujo libre o superficial. (A) Superficie de vegetación emergente; (B) superficial de libre flotación y (C) superficial de hojas flotantes y raíces adheridas.

Fuente: (IWA, 2000)

2.8.4.3.6.2 Humedales artificiales de flujo subsuperficial (HAFS)

En este tipo de sistemas, no hay una columna de agua continua, por lo tanto son cargados intermitentemente, el nivel del agua se mantienen totalmente por debajo del lecho filtrante, esto evita los problemas con la proliferación de insectos (Cooper, 1993). Se caracterizan porque la circulación del agua tanto vertical como horizontal se realiza a través de un medio granular (subterráneo) por gravedad, con una profundidad de agua de 0.6 m, y la zona radicular de las macrófitas emergentes; es por ello que no existe lámina de agua a la vista del observador (Pérez, 2013).

Las pérdidas de energía no son significativas ya que este tiene una densa capa de vegetación, otra de hojarasca y una última de grava relativamente seca, lo que hace que las pérdidas de energía sean relativamente pequeñas, por lo que pueden ser ignoradas en el modelo de diseño (Reinoso, Torres, & Bécares, 2008).

Los materiales que comúnmente se utilizan como material de soporte o medio granular en estos sistemas son la grava y arena, aunque el suelo presente en la zona también puede servir como medio de soporte, esto es dependiendo de las características hidráulicas del mismo (Kadlec & Wallace, 2009).

Las ventajas de este tipo de humedales es que requieren mínimo personal y equipos electromecánicos; no emitirá ruido ni malos olores, asimismo, aportara al paisajismo del lugar, debido a que se mezclaran con el entorno, y lo más importante es que no requiere de elementos mecánicos para la generación de oxígeno (Arce & Terreros, 2011).

El principal inconveniente de este tipo de sistemas es la colmatación de los espacios libres del lecho filtrante a causa del crecimiento de las raíces y rizomas de las plantas macrófitas emergentes (Vymazal, 2008), lo que puede llegar a establecer caminos preferenciales para el agua, con lo que se reduce el tiempo de retención y por lo tanto, la capacidad de depuración del filtro (Vymazal & Kropfelová, 2008). Asimismo, el fósforo, los metales y algunos compuestos orgánicos persistentes que son removidos, permanecen en el sistema ligados al sedimento y por ello se acumulan con el tiempo (Días, 2015). Además, el descuido del sistema puede provocar la proliferación de insectos y afectar a la salud pública y a los habitantes presentes (Arce & Terreros, 2011).

Este tipo de humedales a su vez se divide en dos que son: humedales artificiales subsuperficiales de flujo vertical y humedales artificiales subsuperficiales de flujo horizontal (Pérez, 2013).

2.8.4.3.6.2.1 Humedales artificiales subsuperficiales de flujo vertical (HASFV)

En los humedales artificiales subsuperficiales de flujo vertical, el agua residual no se encuentra saturado a diferencia de los horizontales, aquí el agua fluye desde arriba hacia abajo a través de un sistema de tuberías con la ayuda de una bomba (Delgadillo et al., 2010) (figura 16); el agua se infiltra verticalmente a través del sustrato o lecho filtrante (arenas, gravas) mediante flujos discontinuos (Dittmer, Meyer, & Langergrabe, 2005), el cual entra en contacto con los microorganismos presentes en el humedal, que se encuentran en las raíces de las plantas, que finalmente se recoge en una red de drenaje situada en el fondo del humedal (Hoffmann, Plastzer, Winker, & Muench, 2011).

La aplicación de agua se efectúa de forma intermitente, para preservar y estimular al máximo las condiciones aerobias del medio poroso, se suele colocar un sistema de aeración con chimeneas, que son tuberías cribadas con salidas al exterior para oxigenar al humedal (Delgadillo et al., 2010).

En este tipo de humedales la circulación del agua es de tipo vertical y se alimenta a pulsos, de manera que el medio granular no está permanentemente inundado, ya que el medio granular va desde 0.5 a 0.8 m, los sistemas verticales tienen una mayor capacidad de tratamiento en cuanto a los nutrientes (fósforo y nitrógeno) que los horizontales por lo que requieren de menor superficie para tratar una determinada carga orgánica (Sierra & López, 2013).

Estos sistemas pueden funcionar de manera intermitente con periodos de 1-2 días de alimentación y de 4-8 días sin alimentar, se ha demostrado que durante el período donde el sistema permanece sin alimentar, el oxígeno se difunde hacia las raíces de las plantas y éste es aprovechado por los microorganismos para la oxidación de la materia orgánica y del nitrógeno amoniacal, dando excelentes resultados en la remoción de materia orgánica, (Moshiri, 1993), y con cargas superficiales orgánicas superiores a las que se emplean en los Horizontales, entre los 20 y 40 g DBO₅/m².día (Pidre, 2010). Los sólidos en suspensión y la materia orgánica pueden ser removidos en un 90-99% y con una nitrificación casi completa al 90% la oxidación del amoníaco es comúnmente registrada (Von Münch, 2009).

Los Humedales Artificiales subsuperficial de flujo vertical son bastante al igual que los humedales artificiales de flujo horizontal son efectivos en la reducción de SST y DBO₅, produciéndose además en ciertos casos nitrificación, reducción de fósforo; como en los horizontales (Brix, 2007).

En estos sistemas ocurre procesos, físico, químicos y biológicos; son económicos debido a que sus costos de operación y mantenimiento son reducidos, baja generación de subproductos no deseados (Ramírez, Luna, & Arredondo, 2009), no requiere de personal especializado, su construcción se realiza con materiales propios de la zona donde se va a realizar (Ayaz, 2008). Y aplicables para tratamientos secundarios y terciarios de aguas residuales (Rodríguez, Molina, Jácome, & Suárez, 2013).

Los humedales artificiales subsuperficial de flujo vertical (HASFV) son más adecuados que los de flujo horizontal (HASFV), debido a que no requieren de un área demasiado extensa para su construcción (Hoffmann et al., 2011).

Un aspecto sumamente importante del HFV es el riesgo potencial de obstrucción del suelo que puede provocar un fallo general del sistema (Cooper, 2005).

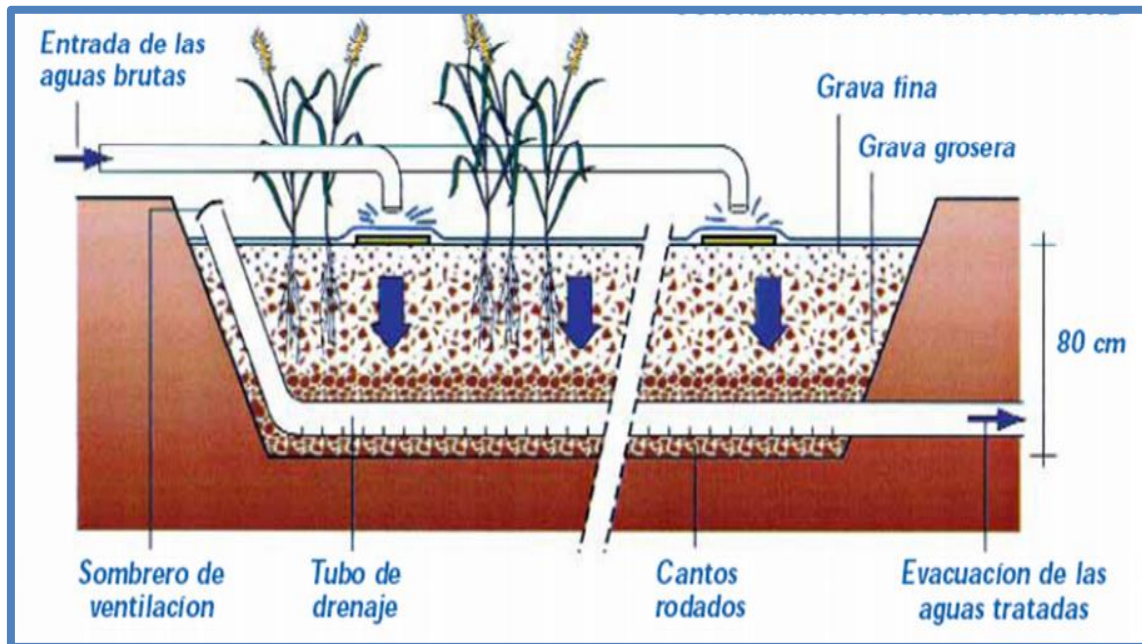


Figura 16. HA subsuperficial de flujo vertical

Fuente: (Arce & Terreros, 2011).

2.8.4.3.6.2.2 Humedales artificiales subsuperficial de flujo horizontal (HASFH)

García & Corzo (2008) mencionan que los humedales artificiales subsuperficial de flujo horizontal (HASFH), está compuesto por una estructura de entrada del efluente, impermeabilización del fondo y laterales con membrana, el cual impide la infiltración al suelo y contaminar cuerpos de aguas subterráneas; también contiene un medio granular (grava y arena), vegetación macrófitas emergente, y una estructura de salida regulables para controlar el nivel de agua (figura 17). Dicho humedal puede ser hábitat de aves pequeñas o ranas (Von Münch, 2009).

En este tipo de sistemas el agua residual no es visible, caracterizada por funcionar permanentemente inundados con un flujo continuo, la cual favorecen las condiciones

anaerobias (Sierra & López, 2013). El agua ingresa de forma permanente uniformemente, circula horizontalmente a través del medio granular, los rizomas y raíces de las plantas, donde la materia orgánica se descompone biológicamente, dándose el proceso de desnitrificación, la cual consiste en la descomposición del nitrógeno inorgánico mediante las bacterias *pseudomonas sp*, transformándolo metabólicamente en gas nitrógeno (N₂) donde posteriormente se pierde en la atmósfera (Benefield & Randall, 1980); asimismo, el fósforo y los metales pesados son fijados en el lecho filtrante por microorganismos presentes (Tilley, 2008). La profundidad del agua es entre 0,3 y 0,6 m (García & Corzo, 2008).

En este tipo de sistemas la transferencia de oxígeno es menor ya que no existe una succión considerable al momento que el agua se desplaza como sucede en los sistemas de flujo vertical, la degradación de los contaminantes se lleva a cabo a medida que el agua está en contacto con la rizósfera siguiendo la línea horizontal (Hoffmann et al., 2011).

Los HASFH, tienen una profundidad del lecho de filtración normalmente de 0,6 a 0.8 m, con la finalidad de que las plantas penetren sus raíces, para que se realice una adecuada oxigenación en todo el lecho, la cual es dado por la liberación de oxígeno de las raíces de las plantas emergentes (Vymazal, 2005), con una pendiente entre 0.5% y 1% (Delgadillo et al., 2010).

Los materiales comúnmente utilizados en estos sistemas son la grava, la cual varía de acuerdo en que parte del humedal se encuentran: el diámetro de la grava de ingreso y salida oscila entre 50 mm a 100 mm (Delgadillo et al., 2010), en cambio en la zona de plantación el diámetro de la grava está constituida entre 3 mm a 32 mm (Cooper, 1993), permitiendo que el flujo del agua sea uniforme previniendo un estancamiento en el sistema y para que la plantación sea la adecuada (Orozco, 2010).

El agua residual no ingresa directamente al medio granular principal (cuerpo), sino que existe una zona de amortiguación generalmente formada por grava de mayor tamaño (Delgadillo et al., 2010). El agua tratada se recoge por debajo de la superficie de la cama. (Sim, 2003), con un tubo de drenaje cribado, rodeado con grava de igual tamaño que la utilizada al inicio. Es fundamental que el agua residual que ingresa al sistema sea inferior entre 5-10 cm para evitar la proliferación de vectores y malos olores (Delgadillo et al., 2010).

Los HASFH consisten en un monocultivo de plantas emergentes, la cual es la utilización de un solo tipo de planta depuradora (tabla 3) (Fernández, 2005).

Tabla 3

Tasas de carga superficial en HAFSH

Constituyente	Concentración típica de afluente (mg/L)	Meta de tratamiento del efluente (mg/L)
Carga hidráulica (pulg/ día)	3 a 12	
DBO	30 a 175	10 a 30
SST	30 a 150	10 a 30
Nitrógeno total	2 a 40	1 a 10
Fósforo total	1 a 10	0.5 a 3

Fuente: (EPA, 1999).

Las ventajas de los HAFSH, es la prevención de mosquitos y olores (Kurup, 2007), la eliminación del riesgo de que el público entre en contacto con el agua residual parcialmente tratada y protección ante cambios térmico, debido a que el agua circula a un nivel subsuperficial (debajo de la tierra) (Orozco, 2010).

Pero sus desventajas son que requieren de espacios grandes para ser instalado y el proceso de remoción de los nutrientes nitrógeno y fósforo no son tan eficientes. Asimismo, el fósforo, los metales y algunos compuestos orgánicos persistentes que son removidos, permanecen en el sistema ligados al sedimento y por ello se acumulan con el tiempo (Días, 2015). Además, el descuido del sistema puede provocar la proliferación de insectos y afectar a la salud pública y a los habitantes presentes (Arce & Terreros, 2011).

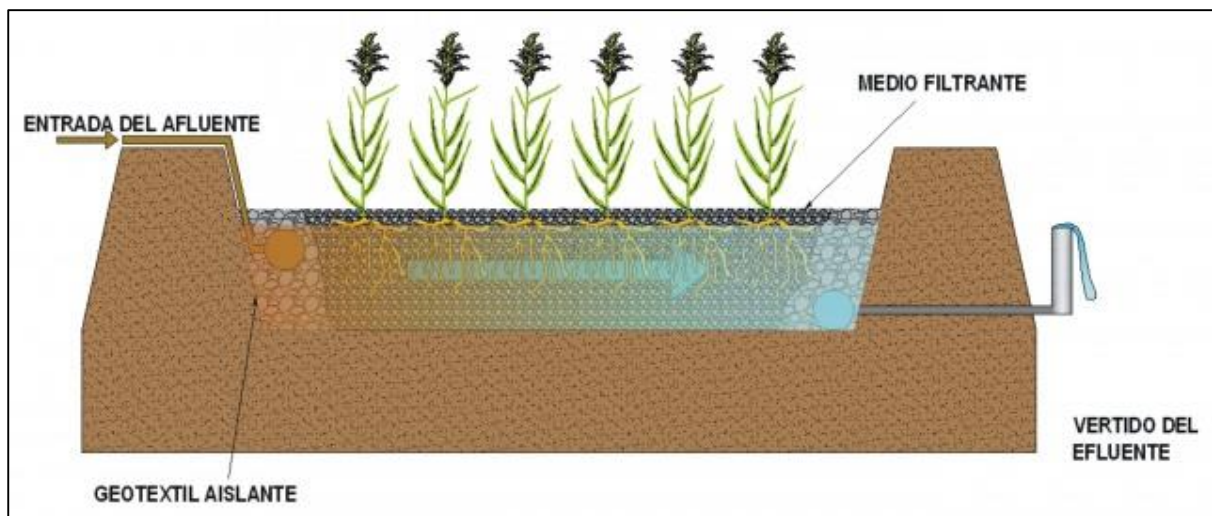


Figura 17. HAFSH

Fuente: (Delgado, 2011)

En la comunidad Cruz verde, del distrito de Bambamarca, Provincia Hualgayoc Departamento Cajamarca, las aguas residuales domésticas no son tratadas adecuadamente principalmente en las comunidades, ya que son utilizados directamente en la agricultura, motivo por el cual se requiere utilizar el tratamiento de aguas residuales mediante humedales artificiales, ya que es un método eficiente, fácil y económico, accesible a presupuesto cómodos, y sobre todo porque no se puede implementar tratamientos convencionales.

2.8.4.3.7 Medio granular o lecho filtrante

El medio granular o lecho filtrante consta de diferentes diámetros (tabla 4), la cual apoya la estructura de la raíz de la vegetación emergente, dando lugar a los procesos de retención y sedimentación de la materia en suspensión y la asimilación de los nutrientes, y la inactivación de los microorganismos patógenos (Delgadillo et al., 2010). Y es homogéneo, duro, durable y capaz de mantener su forma a largo plazo. Además, permite un buen desarrollo de las plantas y de la biopelícula (Hoffmann et al., 2011).

Sobre la superficie del medio de soporte crece la masa de microorganismos semejante a lo que ocurre en un filtro percolador, sin embargo, se considera que el crecimiento microbiano en estos sistemas no debe provocar obstrucciones como ocurre en los filtros percoladores (Brix, 1994).

En el caso de los humedales con flujo subsuperficial horizontal que emplean suelo presentan un potencial de remoción de fósforo y amonio semejante al reportado en los sistemas con flujo libre; en cambio en los sistemas con flujo subsuperficial vertical debido a que el flujo es intermitente las condiciones aerobias se restauran periódicamente y el amonio adsorbido, por el suelo puede liberarse por la vía de la nitrificación bacteriana y los sitios de intercambio quedarían libres para futuras adsorciones. Es por ello que en los sistemas de flujo subsuperficial que emplean grava la capacidad de remoción de fósforo es muy limitada (Dangcong, Bernet, Delgenes, & Moletta, 2000).

Tabla 4

Medio granular o lecho filtrante en los HAFSH

Tipo de sustrato	Diámetro efectivo D (mm)	Porosidad n (%)	Conductividad hidráulica K (m³/m²/d)
Arena gruesa	2	28-32	100-1.000
Arena gravosa	8	30-35	500-5.000
Grava fina	16	35-38	1.000-10.000
Grava media	32	36-40	10.000-50.000
Roca gruesa	128	38-45	50.000-250.000

Fuente: (Delgadillo et al., 2010).

2.8.4.3.8 Microorganismos y demas organismos que se desarrollan en los humedales

En los humedales se desarrollan una gran variedad de organismos que abarcan desde microorganismos como bacterias y protozoos hasta pequeños animales como lombrices; siendo las bacterias el grupo fundamental en el proceso depurador de las aguas residuales, las cuales dependen de dos factores ambientales importantes, los cuales son la disponibilidad del oxígeno y la temperatura (Barrett, Sobsey, House, & White, 2001).

2.8.4.3.9 Condiciones ambientales en los humedales artificiales

Para la existencia de un adecuado proceso de depuración de aguas residuales en los humedales artificiales es necesario tener en cuenta las siguientes condiciones:

- **Incidencia de luz:** Es uno de los principales condiciones para el funcionamiento adecuado de los humedales artificiales (Luna & Castañeda, 2014). Es por ello que el humedal artificial siempre tiene que contar luz solar, y poca sombra para un adecuado funcionamiento (Heike & Winker, 2011).
- **Temperatura:** los humedales pueden trabajar en climas fríos hasta los 10 °C, como también en cálidos por encima de los 20 °C, llegando a los 37 °C (Heike et.,

2011); lo cual favorece el crecimiento de las plantas y por ende de los microorganismos (Bernal, et al., 2003).

- **pH:** Deben contar con un pH dentro del rango aceptado 6.5 – 8.5.
- No debe contener un olor desagradable o putrefacto (Delgadillo et al., 2010).
- **Salinidad:** Debe contener un buen contenido de salinidad, ya que es importante para el crecimiento de las especies emergentes (Delgadillo et al., 2010).
- **Humedad:** Soportan una humedad alta de acuerdo al lugar donde se encuentren (Kadlec, 1997).

2.8.4.3.10 Diseño del humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal (HAFSH)

El diseño de un humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal deberá seguir los siguientes pasos, dados por Jairo Rojas (2004).

a) Determinación de la carga, se calculará mediante la ecuación 1

$$C = Q * DBO_5$$

Donde:

Q = Caudal de diseño del humedal (m³/día)

C = Carga (gr/día)

DBO₅ = Demanda Biológica de Oxígeno (gr/m³)

b) Cálculo del área superficial se calcula mediante la ecuación 2:

Se calcula mediante la ecuación 2, teniendo en cuenta la carga superficial, que este dato es estándar por la Norma OS.090, de acuerdo a tipo de agua residual que se desea depurar, en este caso es agua residual doméstica, entonces la carga superficial será 10.00 gr/m²*día.

$$AS = \frac{C}{Cs}$$

Donde:

AS = Área Superficial (m²)

Cs = Carga Superficial (gr/m²*día)

C = Carga (gr/día)

c) Dimensionamiento del humedal

Mediante la ecuación 3 se calculará las dimensiones del humedal, considerando al tipo del humedal un rectángulo, cuyos lados son largo por ancho (L*A). Considerar una pendiente del 1% (0.001).

- **Ancho (A):**

$$A = \left(\frac{AS}{2}\right)^{0.5}$$

Donde:

AS = Área Superficial (m²)

A = Ancho (m)

- **Largo (L):**

$$L = 2 * A$$

Donde:

L = Largo (m)

A = Ancho (m)

d) Sustrato:

La grava con menos de 30 mm (3/4”) de diámetro, para un mejor funcionamiento. Si se utiliza grava grande, originara que se incremente la velocidad del paso del agua, resultando en un flujo turbulento y que no se cumpla la Ley de Darcy para el diseño. Caso contrario sucede con la grava de tamaño demasiado pequeño, reducirá la velocidad del paso del agua. Antes del inicio del diseño se recomienda realizar pruebas de conductividad y porosidad del sustrato (grava) (tabla 5), para definirse exactamente el tipo de material a emplearse.

Tabla 5

Materiales empleados en el diseño y construcción en los HAFSH

Tipo de material	Diámetro efectivo (mm)	Conductividad hidráulica (m³/m²/d	Porosidad, n %
Arena gruesa	2	100-1.000	28-32
Arena gravosa	8	500-5.000	30-35
Grava fina	16	1.000-10.000	35-38
Grava mediana	32	10.000-50.000	36-40
Roca gruesa	128	50.000-150.000	38-45

Fuente: (Delgadillo et al., 2010).





e) Tiempo de retención hidráulica:

El tiempo de retención hidráulica se encuentra en el intervalo de 4 a 15 días, siendo lo recomendado 7 días, debido a que si el tiempo de retención es mayor el agua comenzará a tornarse de color oscura, y si es menor no removerá lo suficiente la materia orgánica (Delgadillo et al., 2010).

2.8.4.3.11 Principales especies emergentes utilizadas en los humedales artificiales

La selección de las especies de plantas se debe basar en la presencia en el lugar, estética, impactos en la salud de las personas, funcionamiento a largo plazo y la viabilidad de un área determinada (Vymazal, 2011).

Las especies de plantas son macrófitas emergentes típicos de las zonas húmedas, estas pueden ser (Zhang, 2008):

<p><i>Acorus calamus</i> “Variegata” (Acoro, Cálamo Acuático)</p>  A photograph of the variegated acorus plant, showing its long, narrow, light green leaves with prominent white variegation, growing in a shallow pond.	<p><i>Iris pseudacorus</i> (Lirio Amarillo)</p>  A close-up photograph of a bright yellow iris flower in full bloom, with a green bud visible below it.
<p><i>Arum italicum</i></p>  A photograph of the Arum italicum plant, featuring several upright stems with clusters of bright red, egg-shaped flowers and large, dark green, heart-shaped leaves.	<p><i>Iris sibirica</i> (Lirio)</p>  A close-up photograph of a vibrant blue iris flower with white markings on its petals, set against a background of green leaves.

Caltha palustris (Calta)



Lysichiton americanus (Aro de Agua)



Cyperus alternifolius (Paragüitas)



Pontederia cordata (Pontederia)



Phragmites australis (Carrizo)



Cyperus papyrus (Papiro)



Caltha palustris (Calta palustre)



Typha latifolia (Enea)



Houttuynia cordata "Chameleon"
(Houtuinia)



Xanthosoma violaceum (Oreja de Elefante)



Iris laevigata (Lirio japonés)



Zantedeschia ethiopica (Cala)



Sparganium erectum (Platanaria)



Lythrum salicaria (Arroyuela)



Las plantas emergentes estabilizan el substrato mediante la enraización y limitan la canalización del flujo, dan lugar a velocidades de aguas bajas y permiten que los materiales suspendidos se depositen (Orozco, 2010).

Además, realizan el proceso de respiración, la cual es llevada a cabo durante la noche, donde toman oxígeno del aire circundante y elimina el dióxido de carbono, esto es realizado a través de unos pequeños agujeros que tienen en la parte inferior de las hojas, pero también es a través de los tallos y flores (Domínguez, 2003).

También, transportan CO₂ provenientes del rizoma hacia las hojas más antiguas, para su empleo en la fotosíntesis, el cual consiste en utilizar la energía solar para sintetizar los compuestos orgánicos presentes en el agua residual (Calixto, 2004).

El carbono orgánico también es utilizado por los microorganismos para la desnitrificación, la cual es dada en un proceso anaeróbicas dentro de la capa de hojarasca (Vymazal, 2010).

El movimiento interno del oxígeno hacía las raíces de las plantas no solamente sirve para la demanda de oxígeno que requieren las raíces para su respiración, sino que permite la formación de una rizósfera oxidada alrededor de las raíces, pues a través de ellas fluye una cierta cantidad de oxígeno creando un ambiente aeróbico, mientras que a su alrededor las condiciones son anóxicas, permitiendo de esta forma la descomposición aerobia de la materia orgánica y el crecimiento de bacterias nitrificantes. Se ha estimado que estas plantas pueden transferir entre 0.02 y 12 gramos de oxígeno por día por cada m² de área superficial del humedal (Wetzel, 2001).

El oxígeno liberado por las raíces de las plantas es de gran importancia para el crecimiento microbiano en el caso de los humedales con flujo subsuperficial donde el agua residual fluye a través del medio poroso poniéndose en contacto directo con las raíces y rizomas de las plantas, de aquí que en estos sistemas sea importante que las raíces penetren en toda la profundidad del medio. En el caso de los humedales con flujo libre el agua residual fluye por encima de la capa de suelo, no teniendo contacto directo con la fuente potencial de oxígeno de las plantas; en este tipo de humedal la fuente fundamental de oxígeno es a través de la aireación atmosférica por la superficie del agua (Mantovi, et al., 2003).

Las raíces y rizomas proporcionan una superficie adecuada para el crecimiento de la biopelícula (Joy, 1997). Donde la biopelícula crece adherida a las plantas y sobre el medio granular que permite la transferencia de oxígeno (Arias & Brix, 2003); asimismo, alrededor de las raíces se crean microambientes aeróbicos donde tienen lugar a procesos microbianos, para lograr la nitrificación y los compuestos orgánicos solubles (Chang, Xuan, Daranpob, & Wanielista, 2010)

Asimismo, el tallo y los sistemas de la raíz dan lugar a sitios para la fijación de microorganismos, dentro del humedal artificial (Otárola, 2011).

La presencia de las plantas en los humedales es esencial, pues en el caso de los sistemas con flujo subsuperficial sus raíces son una fuente fundamental de oxígeno y la presencia de sus hojas, tallos, raíces, rizomas y detritos regula el flujo de agua y proporciona superficie para el crecimiento microbiano. En el caso de los humedales con flujo libre de presencia de las plantas limitan, además, la penetración de la luz y evitan el crecimiento de las algas (Hench, et al., 2003).

Cuando las plantas están desarrolladas reducen la intensidad de la luz incidente sobre el medio granular evitándose grandes gradientes de temperatura. Asimismo, protege de la congelación en climas fríos (García & Corzo, 2008).

2.8.4.3.11.1 *Cyperus papyrus* (papiro)

El *Cyperus papyrus* (papiro), es una planta originaria de Egipto, que crece en diferentes partes del mundo. En épocas antiguas servían para la elaboración de manuscritos, debido a su resistencia a la humedad (Pérez et al., 2012).

Además, es una especie de planta palustre del género *Cyperus*, de la familia de las *Ciperáceas* (Orozco, 2010), está constituida por un tallo triangular que puede medir tres a cinco metros de longitud; vive en terrenos arenosos y colmados de humedad (Hoffmann, 2013), soporta abundante insolación durante todo el año; y tiene, la facilidad de multiplicarse a través de sus rizomas, donde brotan nuevos troncos y produce semilla (ver figura 18) (Orozco, 2010).

Asimismo, es perenne rizomatosa robusta, con una umbela en la parte superior de los tallos erectos que crecen hasta 3-5 m de altura, y a menudo forman esteras flotantes. La

estructura suelta de la raíz del papiro proporciona una gran cantidad de sitios para el crecimiento microbiano (Plaza de los Reyes et al., 2011).

El *Cyperus papyrus*, también, tiene un alto potencial para extraer nutrientes (fósforo y nitrógeno) de las aguas residuales debido a la delgada capa de raíces adventicias que permite la interacción del agua con la planta, los cuales son necesarios para su crecimiento (Solís, 2014).



Figura 18. Cyperus papyrus (Papiro)

Fuente: (Solís, 2014).

2.8.4.3.11.1.1 Ciclo de desarrollo

El papiro es una especie que tiene un crecimiento rápido (aproximadamente en tres meses), la cual es dado a través de sus rizomas, de las que brotan nuevos troncos, y durante ese tiempo tienden a absorber gran cantidad de nutrientes (nitrógeno y fósforo) (Hannel, Grayum, Herrera, & Zamora, 2003).

Asimismo, sus hojas son de color verde jade, delgadas, largas, firmes, con espigas marrones (ver figura 17) de diez a treinta centímetros de largo (Orozco, 2010); sus flores son agrupadas inflorescencias, y su época de floración es a finales de primavera y verano (Manual técnico de difusión, 2008); además, soporta temperaturas entre 10° como mínimo y en verano entre 20 a 33 °C, siempre y cuando este en un ambiente húmedo sus raíces; y un pH entre 6 y 8.5 (Hannel et al., 2003). El papiro es provisto de un grueso rizoma rastrero y con tallos de 3-5 m de altura. Además, es robusto y liso. Tiene umbela de numerosos filamentos filiformes de 10-45 cm de largo, de color marrón; y sobre todo es resistente a las plagas y enfermedades (Solís, 2014).

2.8.4.3.11.1.2 Cosecha

Se debe cosechar cada 6 meses, porque las plantas en estado de crecimiento consumen mucho más fósforo y nitrógeno que las plantas adultas, es de fácil cultivo y no es invasora (Torres & Marín, 2012).

2.9 Protocolo de muestreo de aguas residuales

Se tomará como referencia el protocolo estandarizado por él (Ministerio de Agricultura & ANA, 2010).

2.9.1 Tipo de muestra

Existen dos tipos de muestras, las cuales se describen a continuación:

2.9.1.1 Muestras simples o puntuales

Las muestras simples o puntuales representan la composición de cuerpo de agua original para el lugar, tiempo y circunstancia particular en la que se realiza su captación; y para

cuando se quiera representar un pico máximo o mínimo para su análisis individual (Ministerio de Agricultura & ANA, 2010).

Para el caso de análisis de oxígeno disuelto, temperatura, pH, compuestos orgánicos volátiles tóxicos como: trihalometanos, órganoclorados, sulfuros solubles, cloro residual y otros gases disueltos; y análisis bacteriológicos, la muestra puntual es obligatoria, igualmente para la caracterización de lixiviados se recomienda muestra puntual (Ministerio de Agricultura & ANA, 2010).

2.9.1.2 Muestra compuesta

Se refiere a una combinación de muestras sencillas o puntuales tomadas en el mismo sitio durante diferentes tiempos. La mayor parte de las muestras compuestas en el tiempo se emplean para observar concentraciones promedio, usadas para calcular las respectivas cargas o la eficiencia de una planta de tratamiento de aguas residuales. El uso de muestras compuestas representa un ahorro sustancial en costo y esfuerzo del laboratorio comparativamente con el análisis por separado de un gran número de muestras y su consecuente cálculo de promedios (Ministerio de Agricultura & ANA, 2010).

2.9.2 Selección del punto de monitoreo

La ubicación de los puntos de monitoreo de aguas residuales depende de la ubicación del punto de la descarga (Ministerio de Agricultura & ANA, 2010).

El lugar ideal para ubicar el punto de monitoreo es exactamente antes de que la descarga ingrese a un cuerpo de agua. Pero cuando el punto no sea de acceso fácil ni seguro. En este caso, la muestra debe ser recolectada en el primer punto accesible corriente arriba de la descarga del conducto o canal (Ministerio de Agricultura & ANA, 2010).

2.9.2.1 Frecuencia de monitoreo

La frecuencia del monitoreo se realizan teniendo en cuenta lo siguiente (Ministerio de Agricultura & ANA, 2010):

- Las variaciones en el volumen de aguas residuales generadas por la actividad.
- La estacionalidad correspondiente al cuerpo receptor de los vertimientos residuales.
- Incorporación de nuevas sustancias en el proceso productivo generador de aguas residuales.
- Incremento de la capacidad productiva de la actividad.

2.9.3 Aforo del caudal

Según el (Ministerio de Agricultura & ANA, 2010), existen cinco métodos y son los siguientes:

2.9.3.1 Método volumétrico

Este método es el más sencillo y confiable, el cual consta de un cronómetro y un recipiente aforado. Se estima el tiempo que demora el llenado de agua del recipiente; la relación de estos dos valores permite conocer el caudal en ese instante, mediante la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{V}{t}$$

Donde:

Q = Caudal (m³/seg)

V = Volumen del recipiente (m³)

t = Tiempo en llenar el recipiente

2.9.3.2 Medición en canales abiertos

El vertedero es un canal en el que se coloca una represa cuyo rebosadero puede adoptar distintas formas; el líquido represado alcanzará distintas alturas en función del caudal, relacionadas por ecuaciones (ver anexo 1) dependientes del tipo de vertedero; este método se utiliza más para plantas de tratamientos convencionales (PETAR).

2.9.3.3 Medición por velocidad

La canaleta Parshall es el dispositivo ideal para usar en canales abierto para monitoreo continuo de caudal. La fórmula general para calcular es:

$$Q = 4WHn$$

Donde:

Q = Caudal (m³/seg)
W = Ancho de la Garganta (m)
H = Altura (m)
n = 1.522 * W (0.026)

2.9.3.4 Método del correntómetro

Este método se estima utilizando un medidor de velocidad (correntómetro) para determinar la velocidad superficial del agua y luego efectuando la medición del área transversal del curso de agua.

$$Q = V * A$$

Donde:

Q = Caudal (m³/seg)
V = Velocidad (m/seg)
A = Área de la sección transversal (m)

2.9.3.5 Método del flotador

En este método se necesita encontrar primero la velocidad mediante el uso del flotador, luego se estima la longitud del espacio recorrido por el flotador. La estimación del tiempo utilizado por flotador en completar el espacio seleccionado y la longitud nos servirá para la medición de la velocidad del flujo de agua. Realizar un promedio de 05 mediciones para descartar los valores errados.

2.9.4 Toma de muestras

Las muestras de agua deberán ser recogidas en frascos de plástico o frascos de vidrio, lo cual dependerá del parámetro a analizar (anexo 2). Asimismo el volumen necesario de muestra queda determinado por método analítico empleado por el laboratorio responsable de los análisis (Ministerio de Agricultura & ANA, 2010).

2.9.4.1 Parámetros microbiológicos

La toma de muestra microbiológica deberá realizarse en frascos de vidrio y esterilizados, no deben ser sometidos al enjuague, la toma de muestra es directa dejando un espacio para aireación y mezcla de 1/3 del frasco de muestreo.

2.9.4.2 Parámetros físicos químicos – inorgánicos

Generalmente estas muestras pueden ser tomadas en frascos de plástico directamente del cuerpo de agua. Antes se debe realizar el enjuague del frasco con un poco de muestra, agitar y desechar el agua de lavado corriente abajo. No es necesario llenar un 100%, pero en caso se requiera la adición de preservante se dejará cierto volumen libre para la adición del preservante

respectivo. Luego de cerrar el frasco se debe realizar una agitación para homogeneizar la muestra.

2.9.4.3 Parámetros de campo

Para analizar los parámetros in situ es necesario contar con:

- Multiparámetro
- Oxímetro
- GPS
- Agua destilada

2.9.5 Cadena de custodia

Es el proceso de control y vigilancia de la muestra, incluyendo los métodos de toma de muestra preservación, codificación, transporte y su correspondiente análisis. Ésta es esencial para asegurar la representatividad e integridad de la muestra desde su toma hasta el reporte de sus resultados. Con la cadena de custodia se asegura la confiabilidad de la muestra y permitir la trazabilidad de la misma (anexo 3) (DIGESA, 2007).

2.10 Métodos de análisis de los parámetros presentes en las aguas residuales

Los parámetros que se deben analizar en las aguas residuales son las siguientes:

2.10.1 Nitrógeno Total

Para analizar este método primero se tiene que realizar una previa destilación, la cual consta en que la muestra se tampona a pH 9.5 con un tampón de borato para reducir los

compuestos orgánicos nitrogenados. El nitrógeno (amoníaco) consta de tres métodos que son (APHA, AWWA & WPCF, 1985).

2.10.1.1 Método de la Nesslerización

Este método se utiliza para las aguas residuales muy depuradas, con concentraciones de $\text{NH}_3 - \text{N}$ superiores a 20 $\mu\text{g/l}$ (APHA, AWWA & WPCF, 1985).

2.10.1.2 Método titulométrico

En el método titulométrico solo se utiliza muestras que se hayan sometido a una destilación previa (APHA, AWWA & WPCF, 1985).

2.10.2 Fósforo Total

Para el análisis del fósforo se puede realizar mediante cuatro métodos que son:

2.10.2.1 Método colorimétrico del ácido vanadomolibdofosfórico

En una solución diluida de ortofosfato, el molibdato amoníaco reacciona en condiciones ácidas para formar un heteropoliácido, ácido molibdofosfórico. En presencia de vanadio, se forma ácido vanadomolibdofosfórico amarillo. La intensidad del color amarillo es proporcional a la concentración de fosfato (APHA, AWWA & WPCF, 1985).

2.10.2.2 Método del cloruro estagnoso

Se forma ácido molibdofosfórico que se reduce con cloruro estagnoso a azul de molibdeno de color intenso. Este método es más sensible (APHA, AWWA & WPCF, 1985).

2.10.2.3 Método automatizado de reducción del ácido ascórbico

El molibdato de aonio y el tartrato antimonílico potásico reaccionan con ortofosfato en medio ácido para formar un complejo antimonio – fosfomolibdato que, al reducirse con ácido ascórbico, produce un color azul intenso adecuado para mediciones fotométricas (APHA, AWWA & WPCF, 1985).

2.10.3 Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅)

Para hallar este parámetro solo se realizará mediante un método que es:

2.10.3.1 Método de incubación

El método consiste en llenar con muestra, hasta rebosar, un frasco hermético del tamaño especificado, e incubarlo a la temperatura establecida durante 5 días. El oxígeno disuelto (OD) se mide antes y después de la incubación, y el DBO se calcula mediante la diferencia entre el OD inicial y el final (APHA, AWWA & WPCF, 1985).

2.10.4 Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Este parámetro se analiza mediante dos métodos:

2.10.4.1 Método de refluo abierto

La mayor parte de la materia orgánica resulta oxidada por una mezcla a ebullición de los ácidos crómico y sulfúrico. Se somete a refluo una muestra en una solución ácida fuerte con un exceso conocido de dicromato de potasio (APHA, AWWA & WPCF, 1985).

2.10.4.2 Método titulométrico

La mayor parte de la materia orgánica resulta oxidada por una mezcla a ebullición de los ácidos crómico y sulfúrico. Se somete a reflujo una muestra en una solución acida fuerte con un exceso conocido de dicromato de potasio (APHA, AWWA & WPCF, 1985).

2.10.5 Coliformes totales y termotolerantes o fecales

Para analizar los Coliformes totales se basa en el siguiente método:

2.10.5.1 Método de fermentación en tubos múltiples, número más probable (NMP)

Utilice un medio líquido de lauril triptosa en la porción presuntiva de la prueba de tubo múltiple. Como alternativa puede emplearse un medio líquido de lactosa (APHA, AWWA & WPCF, 1985).

CAPITULO III:

MATERIALES Y MÉTODOS

En la investigación desarrolla se emplearon diferentes materiales y métodos en todo el proceso de tratamiento mediante el sistema de los humedales.

3.1 Lugar de ejecucion

La construcción de los Humedales Artificiales se realizó en la comunidad “Cruz Verde”, que cuenta con una superficie de 451.38 Km². Se encuentra ubicado en el departamento de Cajamarca, distrito de Bambamarca, provincia Hualgayoc. Sus coordenadas geográficas UTM son 06°40’52” Sur y 78°31’19” Oeste. Se sitúa al km 17 de la carretera a Cajamarca (figura 19).

Los análisis de los parámetros (DBO₅, DQO, nitrógeno total, fósforo total, Coliformes fecales y totales) fueron realizados por el Laboratorio de ensayo Acreditado por el Organismo Peruano de Acreditación INACAL-DA con registro No LE 026, Cajamarca. Los otros parámetros (turbidez, pH, conductividad, temperatura, oxígeno disuelto y sólidos disueltos totales) fueron analizados en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental perteneciente a la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión, ubicada en el Km 19.5 de la carretera central, Ñaña, Lurigancho-Lima.

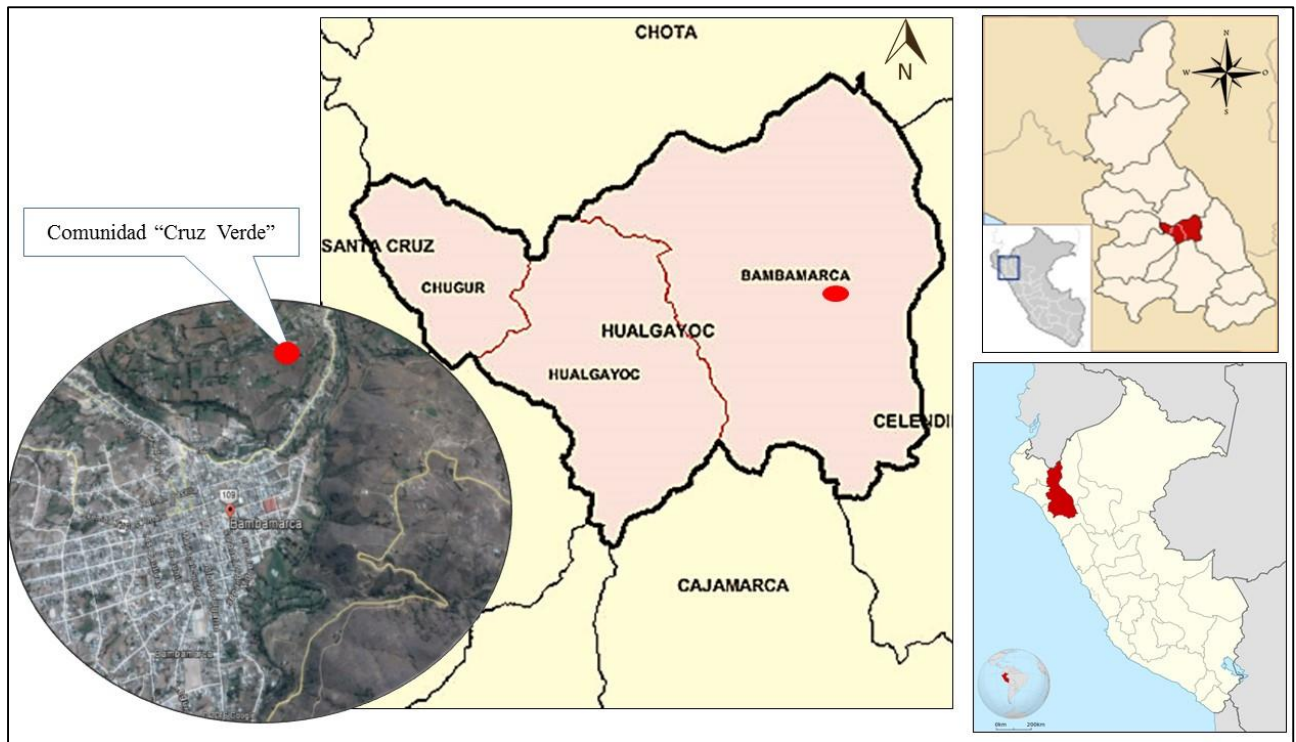


Figura 19. Mapa de ubicación de la zona de estudio

Fuente: Adaptado de Google Earth.

3.2 Descripción de la vivienda

El material de la vivienda es de adobe, con techos de calamina y teja (ver figura 20); está conformada por 5 habitantes (papá, mamá y 3 hijos). La vivienda vierte sus aguas residuales domésticas a un pozo que se ubica en la parte posterior de la vivienda y que a su vez está cerca de una chacra de maíz.



Figura 20. Descripción de la vivienda

Fuente: Cámara fotográfica

3.3 Caracterización del agua de la vivienda

Se realizó un muestreo simple, en un día de la semana de lunes a viernes, donde las actividades de la vivienda se desarrollan entre 7:00 a 7:30 am concernientes al abastecimiento de agua y el vertido de las mismas, siendo la hora puntal donde el caudal máximo horario tiene la mayor cobertura, continuidad y carga orgánica presente en dicha agua. Realizándose un total de 1 muestra por día.

3.4 Características climatológicas de la zona de investigación

Según SENAMHI son:

- Precipitación media anual es de 792 mm.
- Temperatura media anual se encuentra a 19.3 °C
- Con un clima cálido y templado

- Dirección del viento predominante es de Nor Nor este (NNE) a Nor este (NE)
- Velocidad del viento promedio es 6 m/s

3.5 Materiales y métodos en el sistema de tratamiento de aguas residuales mediante humedales artificiales

3.5.1 Aforo del caudal

Los materiales utilizados para el aforo del caudal fueron:

- | | |
|----------------|----------------------|
| • Balde de 4 L | • Guantes |
| • Escalera | • Cronómetro |
| • Soga | • Máscara quirúrgica |

El método que se utilizó para el aforo del caudal fue el método volumétrico, debido a que el sistema de recolección de agua es una tubería de PVC de 4 pulgadas; el cual consistió en:

- a) La fuente a recolectar se ubica a dos metros del nivel de terreno, para ello se utilizó una escalera para poder ingresar al lugar de la desembocadura del agua.
- b) Luego, con la ayuda del balde de 4L y el cronómetro se procedió a realizar la medición del caudal, el cual consistió en que tiempo se llenó el balde con el agua residual doméstica.
- c) Una vez llenado el balde se retiró de la desembocadura del agua con mucho cuidado para evitar derrames, y proceder con la toma muestras para el análisis de los parámetros.
- d) Finalmente, los datos obtenidos en campo (volumen y tiempo), son aplicadas mediante la siguiente ecuación:

$$Q = V * T$$

Dónde:

Q: Caudal (m³/seg)
V: Volumen (litros)
T: Tiempo (minutos)

3.5.2 Muestreo y análisis de los parámetros pre tratamiento

Para el muestreo de los análisis de pre tratamiento de las aguas residuales domésticas se necesitó:

- Culer
- Guantes
- Bata
- Mascara quirúrgica
- 1 frasco de plástico de 500 ml
- 2 frascos de plástico de 250 ml
- 2 frascos de plástico de 100 ml
- 1 frasco de vidrio de 250 ml
- Balde

El muestreo consistió en:

- a) En un frasco de plástico de 250 ml esterilizado se tomó una muestra de agua residual doméstica, para el respectivo análisis del parámetro Demanda Biológica de Oxígeno (DBO).
- b) Para el análisis del parámetro Demanda Química de Oxígeno (DQO) se utilizó un frasco de plástico debidamente esterilizado de 250 ml.
- c) Para los parámetros nitrógeno y fósforo total el frasco utilizado para la toma de muestras de aguas residual fue de 100 ml.
- d) Y para los parámetros microbiológicos (Coliformes fecales y totales) la muestra de agua residual doméstica fue tomada en un frasco de vidrio de 250 ml.

- e) Finalmente, en un frasco de plástico de 500 ml, se llenó al tope la muestra de agua residual para los análisis de los parámetros físicos como: conductividad, oxígeno disuelto, temperatura, turbidez, pH y sólidos totales disueltos.

Una vez que se terminó de realizar el muestreo de los parámetros químicos y microbiológicos, los frascos fueron guardados en el culer para ser enviados al laboratorio INACAL-DA para su respectivo análisis.

Los parámetros físicos (temperatura, conductividad, oxígeno disuelto, sólidos totales disueltos, pH y turbidez) fueron analizados en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental perteneciente a la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión, Lima. Los materiales y equipos empleados en el proceso de análisis fueron:

- 2 vasos precipitados de 250 ml
- Agua destilada
- 6 vasos precipitados de 100 ml
- Multiparámetro HANNA
- Oxímetro HANNA
- Turbidímetro HANNA
- pH metro HANNA

El análisis consistió en:

- a) Para medir la conductividad, sólidos totales disueltos, temperatura; se colocó una muestra de agua residual doméstica en un vaso precipitado de 100 ml y luego se utilizó el equipo Multiparámetro HANNA, y automáticamente arrojó el resultado requeridos de cada parámetro solicitado en sus unidades respectivas.
- b) En otro vaso precipitado de 100 ml de agua residual se midió el oxígeno disuelto mediante el equipo Oxímetro HANNA y su resultado fue en mg/l.

- c) La turbidez se examinó con la ayuda del equipo Turbidímetro HANNA, y la participación de un vaso precipitado con 100ml de agua residual, donde otorgó un resultado en UNT (unidades nefelométricas de turbidez).
- d) Para la medición del pH se utilizó el equipo pH metro HANNA, otorgando resultados en unidades de pH.

El análisis químico del agua residual otorgó información valiosa debido a que el DBO junto con el caudal fueron piezas importantes en el diseño del humedal.

3.5.3 Diseño y construcción del humedal

A. Diseño:

El diseño de los humedales se realizó mediante las informaciones dados por la normativa mostradas en el capítulo II, y el apoyo del software AUTOCAD 2016 - English; los materiales utilizados fueron:

- Laptop
- Lapicero
- Calculadora
- Cuaderno de apuntes

El método utilizado para determinar las medidas exactas del humedal fue tomado de Jairo Rojas (2004), teniendo en cuenta el caudal y la concentración de DBO₅.

El tiempo de retención hidráulica se encuentra en el intervalo de 4 a 15 días, siendo lo recomendado y empleado 7 días (Delgadillo et al., 2010).

B. Construcción

Después de definir el diseño del sistema a implementar se dio inicio a la construcción del humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal; para esto se dieron las instrucciones y

recomendaciones necesarias a los miembros de la familia y personas participantes en el proceso, para garantizar la correcta construcción del sistema. En esta etapa se utilizó lo siguiente:

- Alambre
- Cinta Duck Tape
- Clavos para madera
- Arena fina
- Arena gruesa
- Codos de 90° y 45°
- Grava $\frac{3}{4}$ “ -1/2”
- Grava de $\frac{1}{2}$ ”- 1”
- Mazo
- Picos
- Wincha
- Frotacho de madera
- Cierras
- Picotas
- Aros PETS
- Tuberías
- Llaves de cierre rápido
- Hormigón
- Cemento
- Gravilla
- Plástico de 2 mm y 1 mm
- Martillo
- Baldes
- Palanas
- Plancha de batir
- Ladrillos
- Tablas
- Mallas

Los pasos realizados en la etapa de construcción fueron:

- a) Primero se realizó la limpieza del terreno, retirando malezas, basura y trasplantando algunas plantaciones de maíces y Abas.
- b) Luego se instalaron las vías de acceso al humedal
- c) Se realizaron las instalaciones de tuberías de la vivienda
- d) Se construyó un cerco perimétrico de ladrillo
- e) Se realizó la excavación para la cama, cámara de lodos del biodigestor, y humedal, hechos de forma manual utilizando picotas y palas.

- f) Verificación de las medidas propuestas en el diseño de humedales artificiales, en cuanto al ancho, largo y altura.
- g) Luego se procedió a la construcción de la cámara de registro para determinar la cantidad de agua residual que ingresará.
- h) Después se instaló el biodigestor y la construcción de la cámara de lodos.
- i) Se construyó el humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal, el cual fue revestido con una capa de plástico fino, grueso y nuevamente fino para evitar la contaminación a fuentes de agua subterránea.
- j) Se instalaron tuberías de acuerdo al diseño, con sus respectivos accesorios como: válvulas de cierre rápido, codos entre otros; y al final de cada tubería se colocó un tampón.
- k) Después se llenó los humedales con arena, gravilla, grava fina y gruesa (lecho filtrante).
- l) Luego se procedió a la siembra de la especie emergente *Cyperus papyrus* (papiro).
- m) Finalmente se realizó una prueba hidráulica para ver el funcionamiento del humedal, el cual consistió en agregar agua limpia a todo el proceso, para detectar estancamiento, y así colocar el agua a tratar (agua residual).

3.5.4 Monitoreo del funcionamiento del humedal

Durante el monitoreo se empleó:

- Cámara fotográfica
- Lapicero
- Ficha de observación

Una vez instalado el sistema se dejó que inicie el proceso de la depuración de las aguas residuales, para ello se monitoreo todos los días durante 15 días, los horarios de monitoreo

fueron en horas punta debido al consumo de agua y el vertido de las mismas, estos horarios fueron 7:30 am y 6:00 pm, esto se dio con el fin de controlar y verificar el caudal de ingreso al buen funcionamiento del sistema de tratamiento.

Asimismo, se monitoreo el sistema en marcha para observar la adaptación y crecimiento de la especie macrófita emergente papiro, presencia de mosquitos, rajaduras; también se realizó la limpieza de hojas de eucaliptos caídas en el humedal para no interferir en el proceso o se forme turba. Esto nos permitió garantizar la operación del sistema que se viene tratando.

3.5.5 Muestreo y Análisis de los parámetros post tratamiento

En el muestreo de los análisis fisicoquímicos y microbiológicos después del tratamiento se utilizó:

- Culer
- 1 frasco de plástico de 500 ml
- 1 frascos de plástico de 250 ml
- Preservante (H_2SO_4)
- 1 frasco de vidrio de 250 ml
- Guantes
- 1 frasco de plástico de 50 ml
- Bata
- 2 frascos de plástico de 100 ml
- Balde de 4L

El muestreo consistió en:

- a) Para la Demanda Química de Oxígeno (DBO) se tomó un frasco de plástico de 250 ml y se llenó de agua residual hasta el límite para luego agregarle el preservante (H_2SO_4), y posteriormente fue guardado en el culer para enviarlo al laboratorio INACAL-DA.
- b) La muestra de agua residual tomada para el DQO fue realizada en un frasco de plástico de 50 ml.

- c) Para el caso de nitrógeno y fósforo se utilizaron frascos de plástico de 100 ml, se añadió el preservante (H_2SO_4).
- d) Y para los parámetros microbiológicos (Coliformes fecales y totales) la muestra fue tomada en un frasco de vidrio de 250 ml.
- e) Por último, para los análisis físicos (conductividad, oxígeno disuelto, temperatura, turbidez, pH y sólidos totales disueltos) se utilizó un frasco de 500 ml.

Una vez terminado de realizar el muestreo de los parámetros químicos y microbiológicos, los frascos fueron guardados en el culer para ser enviados al laboratorio INACAL-DA para su respectivo análisis.

Los parámetros físicos (temperatura, conductividad, oxígeno disuelto, sólidos totales disueltos, pH y turbidez) fueron analizados en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental perteneciente a la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión, Lima. Los materiales y equipos empleados en el proceso de análisis fueron:

- 2 vasos precipitados de 250 ml
- Agua destilada
- 6 vasos precipitados de 100 ml
- Multiparámetro HANNA
- Oxímetro HANNA
- Turbidímetro HANNA
- pH metro HANNA

El análisis consistió en:

- a) Para medir la conductividad, sólidos totales disueltos, temperatura; se colocó una muestra de agua residual doméstica en un vaso precipitado de 100 ml y luego se utilizó el equipo multiparámetro HANNA, y automáticamente arrojó los resultados requeridos de cada parámetro solicitado en sus unidades respectivas.

- b) En otro vaso precipitado de 100 ml de agua residual se midió el oxígeno disuelto mediante el equipo Oxímetro HANNA y su resultado fue en mg/l.
- c) La turbidez se examinó con la ayuda del equipo Turbidímetro HANNA, y la participación de un vaso precipitado con 100ml de agua residual, donde otorgó un resultado en UNT (unidades nefelométricas de turbidez).
- d) Para la medición del pH se utilizó el equipo pH metro HANNA, otorgando resultados en unidades de pH.

3.6 Variables de estudio

3.6.1 Variable independiente

Dentro del Sistema de tratamiento mediante el Humedal artificial de Flujo Subsuperficial Horizontal (HAFSH), se emplean especies como parte del tratamiento. En la investigación la Especie a utilizar es la macrófita emergente *Cyperus papyrus* (papiro), donde actuara como una variable independiente para dar lugar al tratamiento del agua residual por ser parte del sistema mediante la absorción de la carga orgánica.

3.6.2 Variables dependientes

Para saber y conocer que un agua residual es tratada y posteriormente es reusada, dependerá de los parámetros a ser modificados que son parte de la materia orgánica; es decir el nombre de tratamiento es porque dentro de ella están los parámetros a ser medibles, los cuales mencionaremos y que en este caso son nuestras variables.

- DBO₅
- DQO
- Nitrógeno total
- Fósforo total
- Coliformes Fecales
- Coliformes totales

- Turbidez
- conductividad
- Sólidos totales suspendidos
- Oxígeno disuelto
- pH
- Temperatura

3.7 Formulación de Hipótesis

- H₀: Los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos no fueron removidos por el sistema de tratamiento mediante humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal.
- H_a: Los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos fueron removidos por el sistema de tratamiento mediante humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal.

3.8 Estudio y diseño de la investigación

3.8.1 Tipo de investigación

El presente trabajo está enfocado en una investigación cuantitativa, ya que, según Hernández, Fernández, & Baptista (2010) este tipo de investigación es secuencial la cual sigue una serie de procesos para llegar a la finalidad, y probatorio porque necesita de análisis para poder comprobar que los resultados son ciertos. Asimismo, la recolección de los datos se fundamenta en la medición de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, que se lleva a cabo por procedimientos estandarizados, debido a que los datos obtenidos son números o cantidades.

3.8.2 Diseño de la investigación

Es una investigación pre-experimental con dos mediciones, la cual consta de preprueba y postprueba (Hernández, Fernández, & Baptista, 2010); con una distribución normal

(Campana de Gauss); es decir es una distribución de variable continua que queda especificada por dos parámetros de los que depende su función de densidad y que resultan ser la media y la desviación estándar típica de la distribución (Mendenhall & Reinmuth, 1978). Asimismo, la distribución normal tiene forma de campana y un solo pico en el centro de la distribución. De esta manera, la media aritmética, la mediana y la moda de la distribución son iguales y se localizan en el pico; además, es simétrica alrededor de su media y es asintótica; es decir que la curva se acerca cada vez más al eje X pero jamás llega a tocarlo, donde las colas de la curva se extienden de manera indefinida en ambas direcciones (Martínez & Marí, 2003). Todas estas características definidas sirven para determinar si los datos obtenidos en las mediciones se pueden ajustar conociendo los parámetros. Este diseño consiste en aplicar mediciones de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del agua residual doméstica antes del tratamiento, dar un monitoreo durante el tratamiento del agua residual doméstica y finalmente realizar mediciones de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del agua, y de esta manera determinar el nivel de remoción de la carga orgánica. Asimismo, su grado de control y manipulación de variables es mínimo.

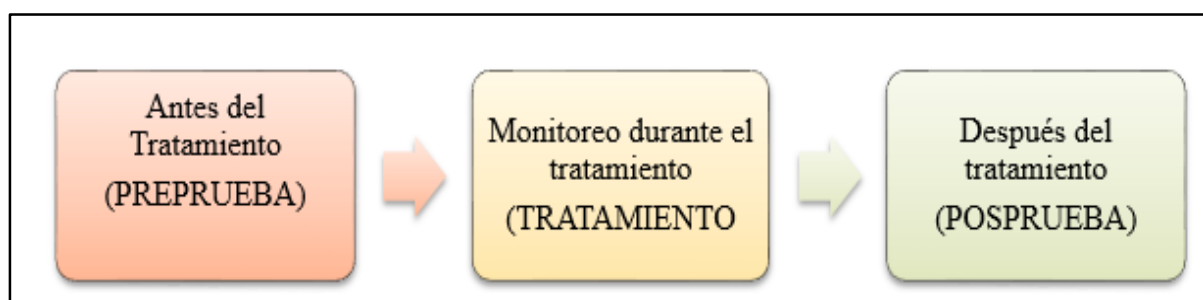


Figura 21. Diseño de la investigación

Fuente: Elaboración propia

3.9 Análisis estadístico

Los datos recolectados fueron introducidos y analizados mediante el Software *Statistica*. Al tener la totalidad de datos de esta investigación se inició contrastando su Distribución Normal mediante la prueba de Shapiro-Wilk, ya que es utilizado para comprobar si unos determinados datos han sido extraídos de una población normal, en esta prueba los parámetros a trabajar son la media y la desviación típica; y dicha prueba es aplicable para muestras pequeñas las cuales son menores de 50 individuos o muestreos ($n < 50$) (Shapiro & Wilk, 1965). Posteriormente, se evaluó si existen diferencias significativas entre el antes y el después de cada parámetro físico-químicos y microbiológicos, aplicando la prueba de T-STUDENT para muestras relacionadas, utilizando el software STATISTICA.

CAPITULO IV:

RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1 Estimación del caudal

Para determinar la cantidad de agua vertida por los 5 habitantes de la vivienda al sistema de tratamiento de aguas residuales mediante humedales artificiales, se realizó el aforo del caudal, la cual fue obtenida mediante el método volumétrico, este método fue aplicado debido a que el sistema de recolección de agua es una tubería de PVC de 4 pulgadas, recomendada y avalada por el Ministerio de Agricultura y la Autoridad Nacional del Agua.

$$Q = V * T$$

Dónde:

Q: Caudal (m³/seg)
V: Volumen (litros)
T: Tiempo (minutos)

$$Q = V * T$$

$$Q = 0.03 \text{ m}^3/\text{dia}$$

4.2 Diseño del HAFSH

El diseño para la construcción del humedal estuvo basado principalmente en el caudal de ingreso y la carga orgánica que esta contenía (DBO₅), y de esta manera determinar el ancho y lago del humedal. Las ecuaciones utilizadas fueron tomadas de Jairo Rojas (2004). La conductividad hidráulica es un parámetro con un valor ya estandarizado por la norma OS.090, el cual varía de acuerdo al tipo de agua a tratar, en esta investigación fue agua residual

doméstica, es por ello que se utilizó una carga hidráulica de 10.00 gr/m²*día. Teniendo en cuenta que se consideró una pendiente del 1% (0.001).

Datos:

$$Caudal\ de\ ingreso = 0.03\ m^3/día$$

$$Carga\ orgánica = 285.1\ gr/m^3$$

a) Cálculo de la carga:

$$C = Q * DBO_5$$

$$C = 0.03\ \frac{m^3}{día} * 285.1\ \frac{gr}{m^3}$$

$$C = 7.13\ gr/día$$

b) Cálculo del área superficial

$$As = \frac{C}{Ks}$$

Donde:

$$Ks = \text{Carga Hidráulica: } 10\ gr/m^2*día$$

$$As = \frac{7.13\ \frac{gr}{día}}{10\ \frac{gr}{m^2 * día}}$$

$$As = 0.71\ m^2$$

c) Dimensionamiento del humedal

Considerando secciones del humedal un rectángulo cuyos lados son (L=largo) y (A=Ancho).

$$\text{Área del humedal} = A \times L$$

Donde:

$$A = \left(\frac{As}{2}\right)^{0.5}$$

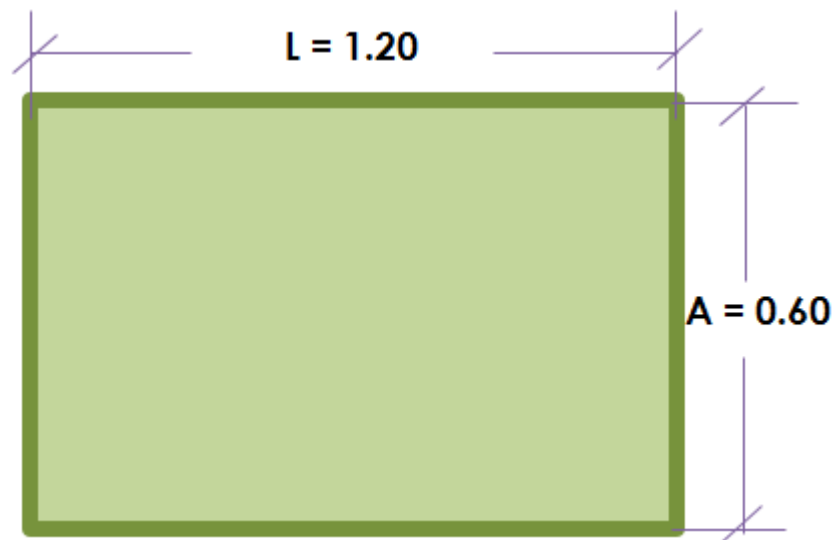
$$A = \left(\frac{0.71}{2}\right)^{0.5}$$

$$\boxed{A = 0.60 \text{ m}}$$

$$L = 2A$$

$$L = 2 * 0.60$$

$$\boxed{L = 1.20 \text{ m}}$$



4.3 Análisis físico-químicos y microbiológicos de los parámetros reales antes y después del tratamiento

Tanto los análisis químicos y microbiológicos (DBO₅, DQO, nitrógeno total, fósforo total, Coliformes fecales y totales), antes y después del tratamiento mediante el sistema de humedales artificiales, fueron realizados por el Laboratorio de ensayo Acreditado por el

Organismo Peruano de Acreditación INACAL-DA con registro No LE 026, Cajamarca. En cambio, los parámetros físicos como turbidez, pH, conductividad, temperatura, oxígeno disuelto y sólidos disueltos totales, fueron analizados en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental perteneciente a la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión, Ñaña, Lurigancho-Lima (ver tabla 6).

Tabla 6

Parámetros físico-químicos y microbiológicos antes y después del tratamiento mediante el sistema de HAFSH

Parámetros	Símbolo	Unidad	Pre – análisis	Post – análisis
Químicos				
Nitrógeno total	N	mg/L	27.96	6.27
Fósforo total	P	mg/L	4.06	0.49
Demanda Biológica de Oxígeno (DBO ₅)	DBO ₅	mg/L	285.1	12.38
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	DQO	mg/L	683.0	30.45
Físicos				
Turbidez	T	°C	527	19.3
pH		Unidad de pH	4.4	6.5
Conductividad	C	us/cm	820	370
Sólidos disueltos totales	SDT	mg/L	400	180
Temperatura	T	°C	27.5	28.2
Oxígeno Disuelto	OD	Mg	10.7	4.2
Microbiológicos				
Coliformes Totales		NMP/100 mL	79000000000	4000
Coliformes fecales		NMP/100 mL	79000000000	1000

4.3.1 Comparación de los parámetros reales antes y después del tratamiento mediante HAFSH

- **Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅)**

En la figura 22 se muestra la diferencia de demanda biológica de oxígeno (DBO₅) con que el agua residual doméstica ingreso al humedal, siendo este valor 285.1 mg/l; y a la salida del sistema de tratamiento la DBO₅ redujo notablemente dando como resultado un total de 12.38 mg/l. La eficiencia de remoción de este parámetro fue de un 96%, en un tiempo de retención de 7 días (tabla 7). Esta reducción se debe a la degradación biológica realizada por los microorganismos adheridos a la superficie de las plantas, así como por los microorganismos que se encuentran en la columna de agua.

También, influyen los procesos físicos como la sedimentación que se da por la baja velocidad que se maneja en el humedal ya que trabaja con un flujo laminar constante, esto favorece la floculación y tiende a sedimentarse la materia orgánica que se encuentra en forma suspendida. Además, se da el proceso de filtración, el cual es dado a través del medio poroso. Se considera que el 50% de la DBO₅ es removida en los primeros metros del humedal ya sea por descomposición aeróbica o anaeróbica. El resto de la DBO₅ soluble continúa siendo removida por los microorganismos por procesos aerobios, para ello se necesita oxígeno el cual es adquirido de la atmósfera por difusión, mediante la fotosíntesis de las plantas al interior de la columna de agua y cedido desde las raíces de las plantas; influyendo el requerimiento de nutrientes por parte de las macrófitas emergentes presentes en el humedal (Sanabria, 2009).

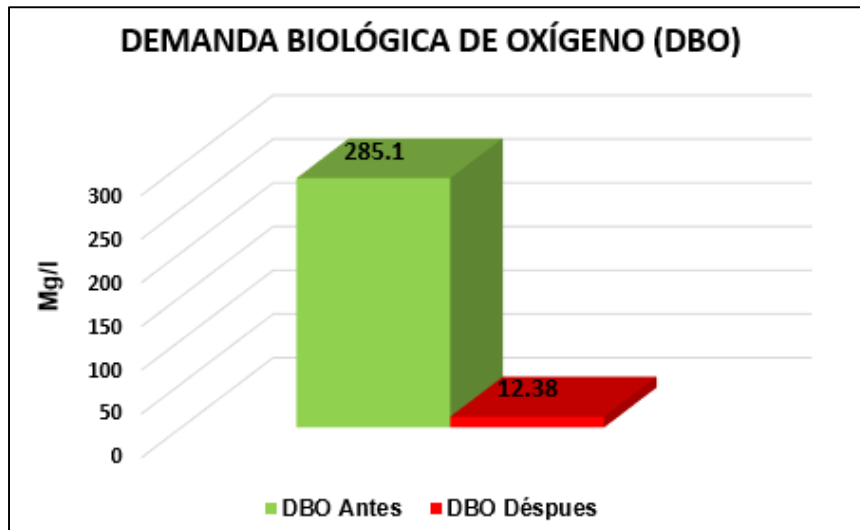


Figura 22. Comparación del parámetro químico DBO_5 antes y después del tratamiento mediante HAFSH

- **Demanda Química de Oxígeno (DQO)**

En la figura 23 se muestra la diferencia de demanda química de oxígeno (DQO) con que el agua residual doméstica ingreso al humedal, siendo este valor 683.0 mg/l; y a la salida del humedal la DQO redujo notablemente dando como resultado un total de 30.45 mg/l. La eficiencia de remoción de este parámetro fue de un 96% (tabla 7). Esta reducción se debe a la actividad biológica donde ocurren procesos químicos como la oxidación por microorganismos desnitrificadores en condiciones aeróbicas, los cuales descomponen todos los compuestos orgánicos reduciendo el oxígeno, convirtiéndolo en gas carbónico (CO_2) y agua (H_2O), donde una parte del CO_2 se pierde en la atmosfera y la otra parte es absorbida por los microorganismos para la síntesis de nuevas células, este proceso depende principalmente de la disponibilidad de oxígeno disuelto, que es transferida a través de las plantas (Arenas & Nuncira, 2010).

También se debe a los efectos combinados entre el tiempo de retención hidráulica; la acción filtrante del sustrato para retener sólidos suspendidos, mediante el proceso de la adsorción, el cual consiste en que las partículas se adhieren al medio de soporte; y por la

absorción de las plantas para su crecimiento (Kadlec, 2003). Además, el crecimiento de las raíces densas y plumosas favorecen la adhesión de las comunidades de bacterias degradadoras de la materia orgánica y actúan como filtros de material particulado (Kim & Geary, 2001).

Esto se debe a que los procesos tanto físicos como químicos se desarrollan mejor en climas cálidos, donde la especie macrófita emergente (Papiro) se desarrolla de manera normal a temperaturas altas y por ende los microorganismos también (Rousseau, Vanrolleghem, & Pauw, 2004), dicha teoría fue comprobada ya que el humedal fue puesto en marcha en la temporada de verano y es por ello su alta remoción de DBO.

El tiempo de retención fue de vital importancia debido a que se observó que a mayor tiempo de retención el agua residual comenzó a tornarse de color marrón con un olor putrefacto, Delgadillo, Camacho, Pérez & Andrade (2010) mencionan que esto se debe a que las plantas no realizan adecuadamente el proceso de la fotosíntesis y la transferencia de oxígeno, es por ello que los microorganismos tampoco se desarrollan. Y a menor tiempo el proceso de remoción no se realiza al 100%. Siendo el tiempo de retención adecuado aplicado y recomendado 7 días.

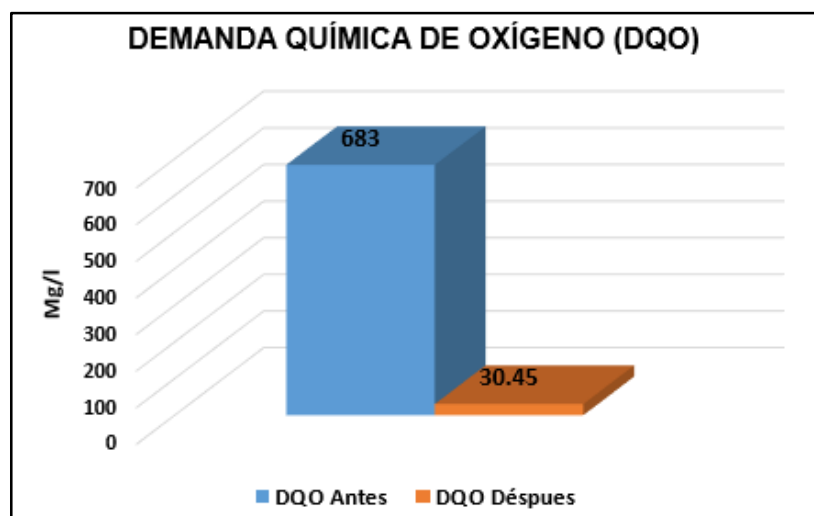


Figura 23. Comparación del parámetro químico DQO antes y después del tratamiento mediante HAFSH

- **Nitrógeno Total**

El ingreso del agua residual doméstica con nitrógeno total al humedal fue de 27.96 mg/l, luego se realizó el análisis respectivo y se obtuvo como resultado un total de 6.27 mg/l (figura 24), notándose una reducción considerable, con una eficiencia de remoción del 78% (tabla 7). Dicha remoción se debe a que el nitrógeno total fue sintetizado por las bacterias nitrificadoras convirtiéndolo en nitrito (NO_2^-) el cual es volátil y se pierde por vaporización en la atmósfera (aproximadamente el 15% de nitrógeno), también es aprovechado para su crecimiento y evolución ya que al momento de fermentarlo generar energía para su supervivencia.

Asimismo, la eficiencia de remoción está relacionado con el tiempo de retención hidráulico y decrece significativamente en diseños con tiempo de retención menor a 5 días (Sanabria, 2009); es por ello que el tiempo de retención recomendado y utilizado fue 7 días (Delgadillo et al., 2010).

También, influyó el clima debido a que los procesos de nitrificación y desnitrificación se desarrollan mejor en climas cálidos, y dicha investigación fue aplicada en la temporada de verano, es por ello la gran eficiencia de este parámetro en su remoción. En cambio si se hubiera realizado en la temporada de invierno, los procesos (nitrificación y desnitrificación) no se llevarían a cabo correctamente impidiendo que el nitrógeno sea eliminado, lo cual puede causar eutrofización en ellas, eliminando la actividad microbiana, debido a las bajas temperaturas que existirían en el humedal (Kemp & George, 1997).

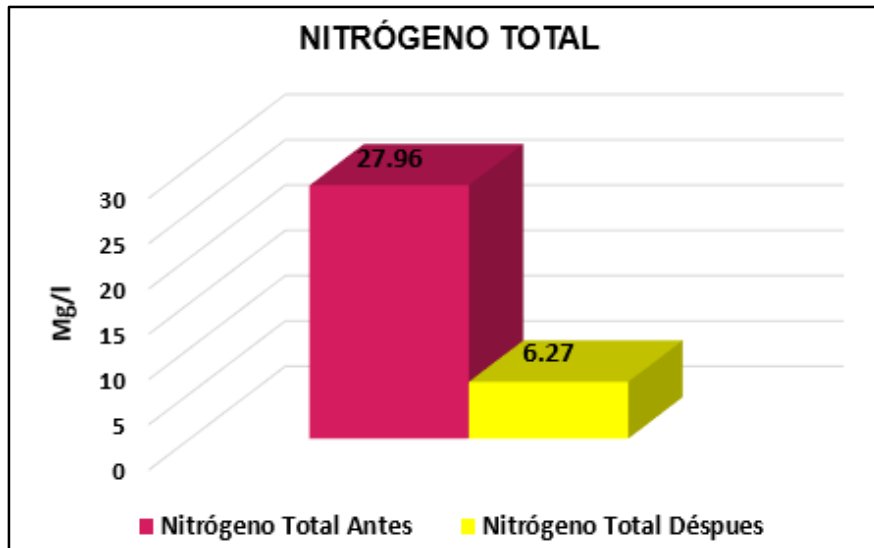


Figura 24. Comparación del parámetro químico Nitrógeno Total antes y después del tratamiento mediante HAFSH

- **Fósforo Total**

El agua residual doméstica en un inicio contaba con una cantidad de 4.06 mg/l de fósforo total, dicha agua paso por un proceso de depuración mediante humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal obteniendo como resultado total 0.49 mg/l de fósforo (figura 25). Obteniendo una eficiencia de remoción del 88% (tabla 7), dicha remoción se basa en la asimilación de las plantas de diferentes formas iónicas, el cual se integra al metabolismo principalmente en el proceso de la fotosíntesis; los microorganismos también absorben fósforo para su crecimiento en menor cantidad; y la mineralización de los restos vegetales y fósforo orgánico (Muñoz, 2015). Pero principalmente se debe a la adsorción del medio poroso o medio de soporte el cual está conformado por grava, arena y gravilla. La capacidad de adsorción depende de la presencia de hierro, aluminio o calcio en el lecho poroso, así como de la presencia de minerales de arcilla o materia orgánica; si el suelo se vuelve anaerobio como resultado de estar inundado, el Fe^{+3} (ion férrico, tiene una fuerte tendencia de capturar iones) se reducirá a Fe^{+2} (ion ferroso) lo cual conduce a que la adsorción sea menos fuerte y se libere fosfato (García

& Corzo, 2008). También ocurre el proceso de sedimentación por el flujo continuo que trabaja el humedal.

La eficiente remoción se basa en el tiempo de retención, cuando dicho tiempo es medio (6-7 días), la eficiencia de remoción es considerable, es por ello que en la investigación se empleó un tiempo de retención de 7 días. Con el pasar del tiempo el lecho filtrante se va a saturar y es cuando el proceso de remoción de fósforo será lento (Delgadillo et al., 2010).

Kowalik, Obarska, & Poland (1998) menciona que, para no aumentar la concentración de fósforo durante su tratamiento, es necesario retirar la presencia de residuos vegetales y de esta manera garantizar el buen funcionamiento de remoción y obtener agua en un buen estado.

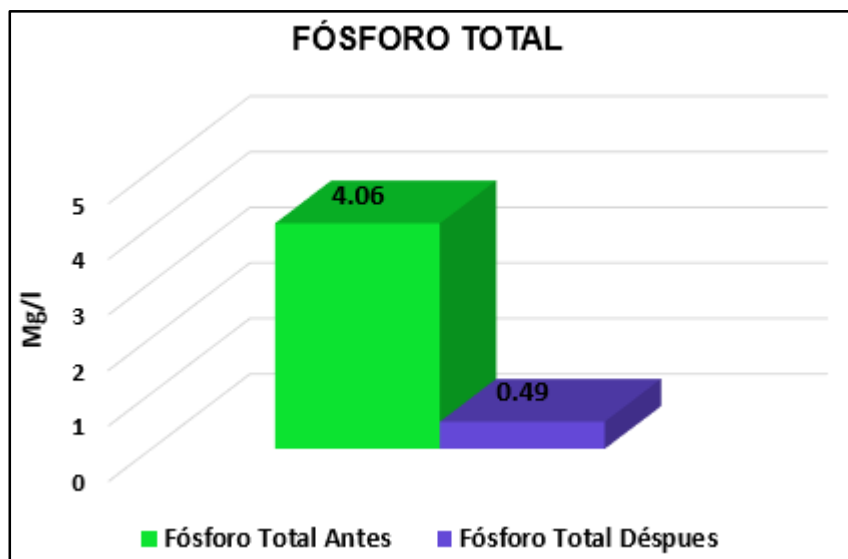


Figura 25. Comparación del parámetro químico Fósforo Total antes y después del tratamiento mediante HAFSH

- **Turbidez**

El agua residual doméstica ingreso al humedal con una turbidez de 527 unidades nefelométricas de turbidez (UNT), y a la salida del humedal se obtuvo un total de 19.3 UNT (figura 26); demostrando una eficiencia de remoción del 96% (tabla 7), indicando que el agua

residual se encuentra en buen estado, esta variación de turbidez se notó claramente por la transparencia del afluente en comparación con el efluente, esto se dio principalmente por las propiedades de adsorción que tienen las plantas y por el medio poroso.

En la presente investigación se determinó que a mayor tiempo de retención alrededor de 12-14 días el agua comenzó a tornarse de color negro y con olor fuerte a descomposición, el cual es causado por el material coloidal la cual impide la transmisión de la luz solar y por ende las plantas no pueden realizar adecuadamente el proceso de la oxigenación y fotosíntesis, asimismo los microorganismos tampoco descomponen adecuadamente la materia orgánica (Queralt, 2003); es por ello que el tiempo adecuado, recomendado y utilizado en la investigación fueron 7 días.

Von Münch (2009) indica que cuando el agua residual doméstica se torna de un color grisáceo muestra un insuficiente suministro de oxígeno, en cambio un color ligeramente amarillo o marrón, indica una situación normal en los tratamientos biológicos principalmente causados por los ácidos húmicos, los cuales provienen de la transformación biológica de la materia orgánica y las células bacterianas muertas.

Cabe recalcar que la mayor turbidez está asociada con el tamaño de partícula (arcillas, limos, algas, entre otras), ya que a menor tamaño se tendrá mayor turbidez en el agua residual (Cárdenas, 2005).

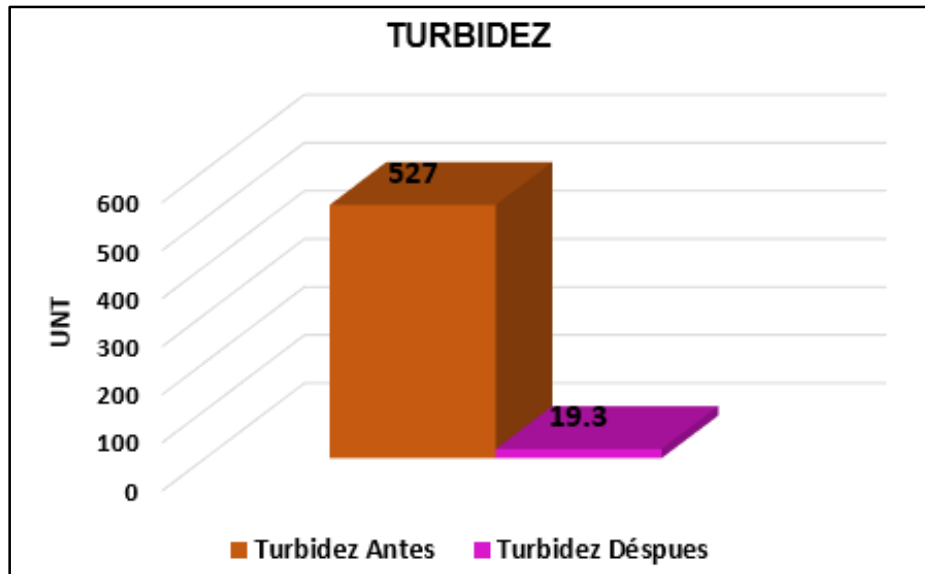


Figura 26. Comparación del parámetro físico Turbidez antes y después del tratamiento mediante HAFSH

- **Potencial de Hidrógeno (pH)**

En un inicio el agua residual doméstica se encontraba con un pH ácido de 4.4, pero después del tratamiento mediante humedales artificiales el resultado cambio y fue un pH estable de 6.5 (figura 27), el cual es óptimo para el crecimiento de bacterias nitrificantes ya que estas crecen en ambientes con pH entre 6.5 a 8.6, y este reporte es cierto ya que en dicha investigación la remoción del nitrógeno fue del 78%.

Asimismo, Romero (2004) menciona que el contenido típico de materia orgánica de estas aguas es un 50% de carbohidratos, un 40% de proteínas y un 10% de grasa y el pH puede variar de 6.5 a 8.0 por dicho contenido (Metcalf & Eddy, 1991)

La eficiencia de remoción de pH fue del 68% (tabla 7), esto fue determinado mediante la ecuación propuesta por Shu en el año 2003. La cual consiste en división de pH antes, entre pH después por 100 (ver ecuación 6).

Ecuación 6:

$$\text{Eficiencia de Remoción (\%)} = \frac{(\text{pH de entrada})}{(\text{pH de salida})} * 100$$

La estabilidad del pH se debe a la capacidad del humedal para amortiguar sus variaciones de carga orgánica ya que el agua residual tratada es doméstica (Romero, 2004).

Cuando el pH se encuentra por debajo de 4 o encima de 9.5 las bacterias no toleran y automáticamente morirán (Metcalf & Eddy, 1991). Si el pH aumenta es porque por cada mol nitrificador de Amonio, se librea dos moles de iones hidronio (H^+), aumentando la alcalinidad del agua, llevada a cabo cerca de la superficie del humedal donde los niveles de oxígeno disuelto son mayores (Vymazal, 2007). En cambio la disminución de pH es dado por la oxidación bioquímica de ácidos orgánicos y la destrucción de sales de ácidos orgánicos (Romero, 2004).

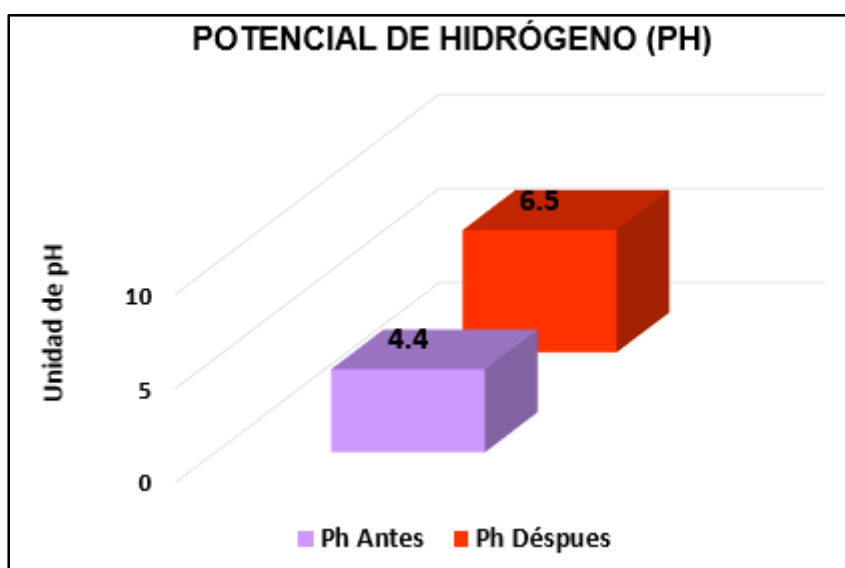


Figura 27. Comparación del parámetro físico pH antes y después del tratamiento mediante HAFSH

- **Conductividad eléctrica (CE)**

El agua residual doméstica ingreso al sistema de tratamiento con una conductividad eléctrica de 820 us/cm, después de pasar por el humedal artificial se obtuvo un resultado es 370 us/cm (figura 28). Mostrando una eficiencia de remoción de un 55% (tabla 7) con un período de retención de 7 días. Esta eficiente de reducción se debe a la evaporación del agua que se da cuando las plantas transpiran de tal modo que las sales en el humedal se concentran (Pirjo, Slawomir, & Yoram, 2010). También, se debe a que la conductividad eléctrica decrece con la longitud del tiempo, profundidad del agua residual y cuando el flujo aumenta. Asimismo, las plantas también reduce la conductividad eléctrica debido a su facilidad de asimilar nutrientes e incorporarlos en sus tejidos (Guido & Durán, 2008).

El lecho filtrante (grava y gravilla) fue lavada antes de ser colocada al humedal, ya que, según Bernal, et al. (2003) estas liberan sales por la fricción con el agua residual a medida que va fluyendo por el sistema. Siendo así que el resultado fue adecuado y dicha agua residual se encuentra en condiciones favorables para ser utilizado tanto para vegetales de tallo bajo y alto como para la bebida de animales.

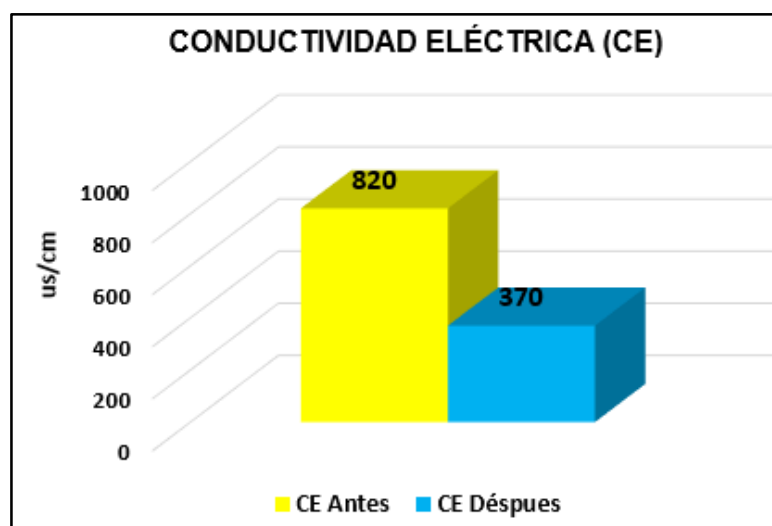


Figura 28. Comparación del parámetro físico Conductividad eléctrica antes y después del tratamiento mediante HAFSH

- **Sólidos disueltos totales (SDT)**

La cantidad de sólidos disueltos totales en el agua antes de ingresar al humedal fue 400 mg/l, y a la salida se obtuvo un resultado de 180 mg/l (figura 29). Demostrando una eficiencia de remoción de un 55% (tabla 7), en un período de tiempo de 7 días. Esta eficiencia se debe a la degradación biológica (materia orgánica) realizada por los microorganismos adheridos a la superficie de las plantas, así como por los microorganismos que se encuentran en la columna de agua.

También, se debe a la remoción por procesos físicos como la sedimentación que se da por la baja velocidad que se maneja en el humedal y tiende a sedimentarse la materia orgánica y algunas sales inorgánicas (calcio, magnesio, potasio, sodio, bicarbonatos, cloruros y sulfatos) que se encuentra en forma suspendida. Asimismo, el proceso de absorción mediante el lecho de soporte (grava y arena) retiene los sólidos disueltos totales; Además, el crecimiento de plantas en el humedal, facilitan la filtración, evitando el crecimiento de las algas (Bernal, et al., 2003).

En los humedales artificiales subsuperficiales los problemas de resuspensión por el viento no se dan debido a que trabajan sin contacto con el aire, siendo así que las concentraciones de sólidos son menores que en los humedales de flujo superficial o libre (Tanner, 2000).

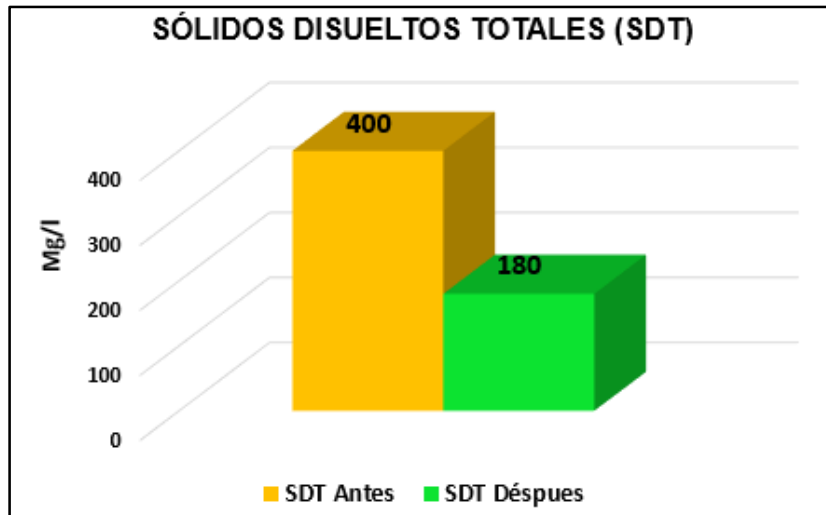


Figura 29. Comparación del parámetro físico Sólidos Disueltos Totales antes y después del tratamiento mediante HAFSH

- **Oxígeno Disuelto (OD)**

La cantidad de ingreso de oxígeno disuelto al sistema de tratamiento fue de 10.7 mg, después de un tiempo de retención de 7 días se obtuvo un resultado de 4 mg (figura 30). La eficiencia de remoción de este parámetro fue del 61% (tabla 7), es bajo debido a que estos sistemas trabajan completamente inundados, con predominio en condiciones anaerobias, donde las concentraciones de oxígeno disuelto son muy bajas en los efluentes (Knight, Ruble, Kadlec, & Reed, 1993).

La eficiencia de remoción del oxígeno disuelto se debe a la producción de oxígeno por los tejidos de las plantas el cual es absorbido de la atmosfera ya sea por convección o difusión, el cual incrementa la degradación aerobia. También, influye la liberación de oxígeno mediante las raíces y rizomas de las plantas en los sedimentos; esto ayudara al incremento a la velocidad de crecimiento y facilitara la degradación de la materia orgánica (Delgadillo et al., 2010).

Este parámetro es necesario para la respiración de los microorganismos aeróbicos, lombrices y algas presentes en el humedal artificial, pero un insuficiente abastecimiento de

oxígeno limitará la oxidación biológica, dando lugar a proceso anaerobios disminuyendo la oxidación de la materia orgánica (Arcos, Alejo, García, & Solís). Caso contrario ocurre cuando existe suficiente cantidad de oxígeno, la oxidación aerobia, gobernara todo el proceso de oxidación y mejorara la calidad del efluente (Delgadillo et al., 2010).

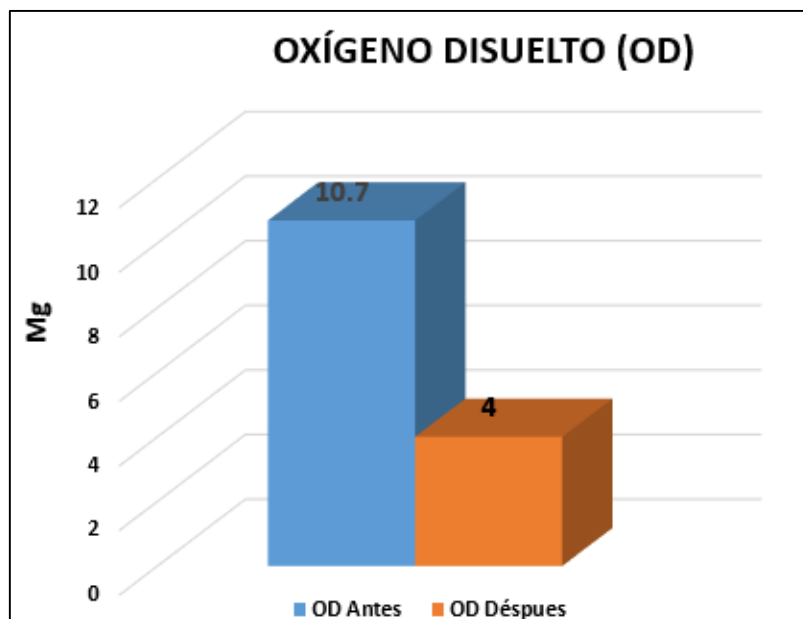


Figura 30. Comparación del parámetro físico OD antes y después del tratamiento mediante HAFSH

- **Temperatura (°C)**

En un pre-análisis se realizó la medición del parámetro físico temperatura obteniendo un valor de 27.5 °C, después que el agua residual paso por el sistema de tratamiento se realizó nuevamente otro análisis donde el valor fue 28.2°C (figura 31); esta variación se debe a que las aguas residuales son más cálidas por su alta concentración de materia orgánica, el cual contiene energía (calor específico) y que es de vital importancia para el crecimiento microbiano y por

ende se den los procesos de nitrificación, desnitrificación y degradación de materia orgánica adecuadas, para la remoción de los parámetros físicos y químicos (Arias & Brix, 2003).

La temperatura final es adecuada porque según Romero (2004), menciona que los procesos de depuración del agua residual se dan en rangos de temperatura entre 10 a 33°C, considerándose una temperatura estable y adecuada para la finalidad que se desea emplear.

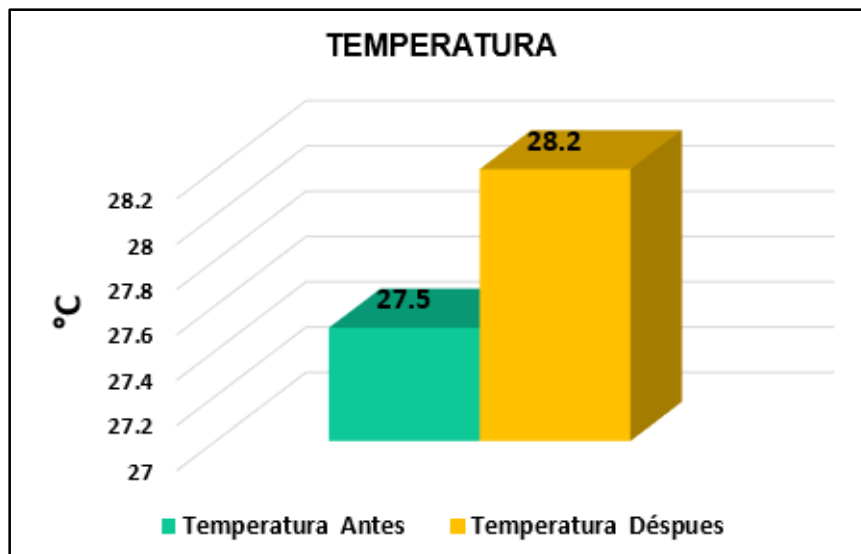


Figura 31. Comparación del parámetro físico Temperatura antes y después del tratamiento mediante HAFSH

- **Coliformes Totales**

La cantidad de Coliformes totales en un inicio fue de 79×10^9 NMP/100 ml, después de pasar por el sistema de depuración se obtuvo un valor de 4000 NMP/100 ml (figura 32). La eficiencia de remoción de este parámetro fue exitosa debido a que removió un 100% (tabla 7), aproximadamente unos 4 logaritmos, con un tiempo de retención de 7 días. Esta exitosa remoción se debe a la falta de condiciones nutricionales y ambientales que se desarrollan en el biodigestor, ya que la mayor parte de la materia orgánica está siendo degradada allí.

Pero los patógenos que aun han pasado al humedal están siendo retenidos mediante procesos físicos como la filtración y la adsorción las cuales son llevadas a cabo a través del medio de soporte (grava, arena y gravilla); otro proceso es la sedimentación, y por último se encuentra la depredación donde el patógeno más fuerte se come al débil para asegurar su supervivencia, pero aun así este es retenido por el medio de soporte (Hagendorf, Diehl, Feuerpfeil, Hummel, & Szewzyk, 2000). Asimismo, las radiaciones ultravioletas también provocan la muerte de algunas bacterias presentes en el humedal (Barrett, Sobsey, House, & White, 2001).

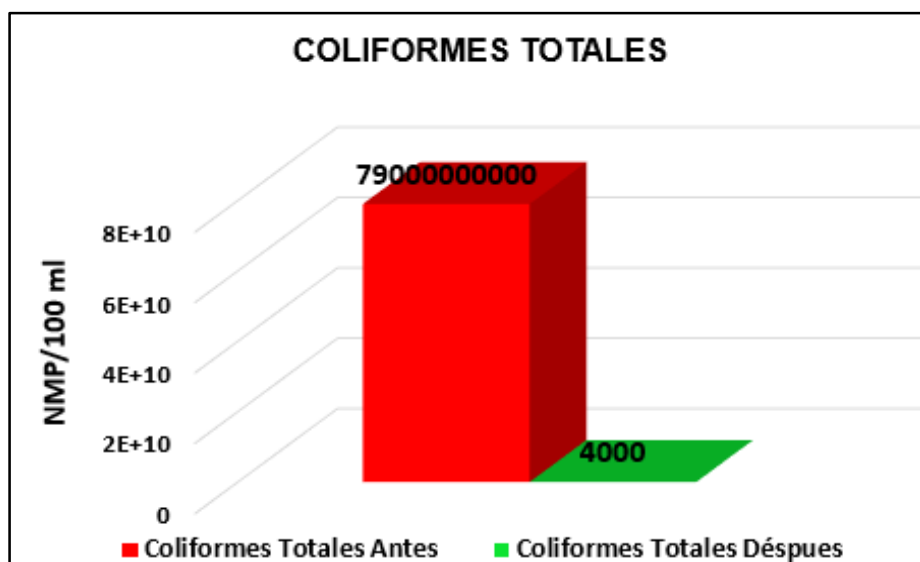


Figura 32. Comparación del parámetro microbiológico Coliformes Totales antes y después del tratamiento mediante HAFSH

- **Coliformes Termotolerantes o fecales**

La cantidad de Coliformes fecales en un pre-análisis fue 79×10^9 NMP/100 ml, después de pasar por el sistema de depuración se obtuvo un valor de 1000 NMP/100 ml (figura 33). Donde la eficiencia de remoción de Coliformes fecales fue exitosa removiendo el 100% (tabla 7), aproximadamente unos 4 logaritmos; dicha remoción se debe principalmente al tiempo de retención, la cual fue 7 días; donde Von Münch (2009) concuerda con este tiempo, ya que él

recomienda un tiempo máximo de 6 a 7 días para una remoción del 98 a 100%. La remoción de los Coliformes o fecales se basan en los procesos de adsorción, sedimentación y filtración, e incluso en la depredación tal como se explica en los Coliformes totales.

Cabe recordar que el tracto intestinal humano contiene grandes cantidades de bacterias de Coliformes termotolerantes, razón por la cual en un pre-análisis se obtuvieron resultado muy elevados, pero la eficiencia de un tratamiento primario y secundario en esta investigación fue suficiente para eliminar en un 100% las bacterias causantes de enfermedades gastrointestinales.

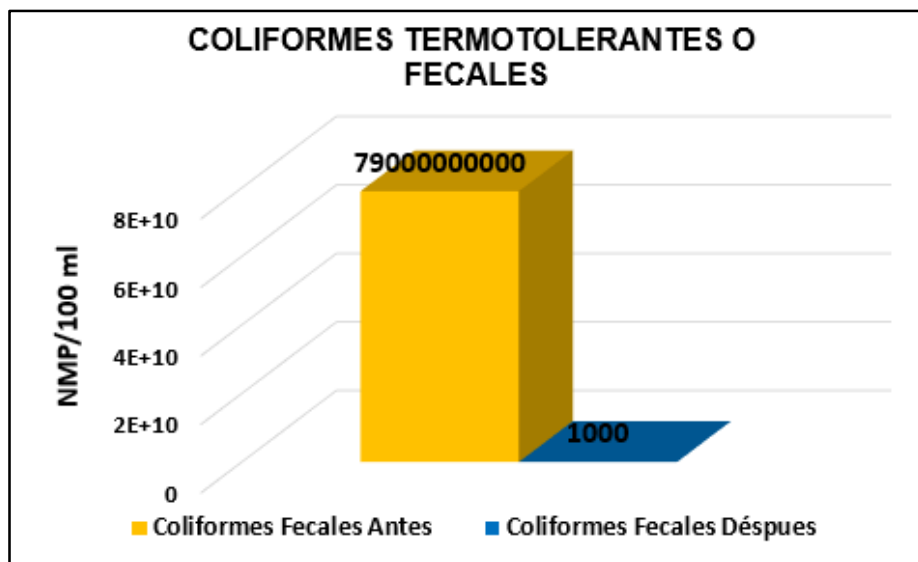


Figura 33. Comparación del parámetro microbiológico Coliformes Termotolerantes o Fecales antes y después del tratamiento mediante HAFSH

- **Olor**

De acuerdo a los resultados oftalmológicos es menor la intensidad del olor a la salida que a la entrada. El mal olor de las aguas residuales tratadas (a huevos en descomposición) indica procesos anaeróbicos, y por lo tanto una situación muy crítica. Este olor a descomposición se perdió al pasar (filtrar) por el medio poroso, con un tiempo de retención (reposo) de 7 días; asimismo, las plantas cumplieron la función de suministrar oxígeno al

humedal para que los microorganismos realicen su labor y de esta manera se obtuvo un agua trata sin olor putrefacto y poder ser utilizada en el regadío de pastizales.

Tabla 7

Remoción de los parámetros físico-químicos y microbiológicos mediante HAFSH del agua residual doméstica

Parámetros	Momentos del tratamiento	Resultados	Disminución entre momentos	Remoción interna	No removido	Eficiencia de remoción (%)	% no removido
DBO (mg/l)	Antes	285.1	272.72	272.72	12.38	96	4
	Después	12.38					
DQO (mg/l)	Antes	694.20	663.75	663.75	30.45	96	4
	Después	30.45					
Nitrógeno total (mg/l)	Antes	27.96	21.69	21.69	6.27	78	22
	Después	6.27					
Fósforo total (mg/l)	Antes	4.06	3.57	3.57	0.49	88	12
Conductividad eléctrica (us/cm)	Antes	820	450	450.0	370	55	45
	Después	370					
Solidos disueltos totales (SDT) (mg/l)	Antes	400	220	220.0	180	55	45
	Después	180					

Oxígeno disuelto (OD) (mg)	Antes	10.7						
	Después	4	6.5	6.5	4.2	61	39	
Turbidez (UNT)	Antes	527						
	Después	19.3	507.7	507.7	19.3	96	4	
Temperatura (°C)	Antes	27.5						
	Después	28.2			28.2			
pH (unidad de pH)	Antes	4.4						
	Después	6.5			6.5	68		
Coliformes totales (NMP/100ml)	Antes	79000000000						
	Después	4000	78999996000	78999996000	4000	100	0	
Coliformes Fecales (NMP/100ml)	Antes	79000000000						
	Después	1000	78999999000	78999999000	1000	100	0	

4.4 Comparación de los resultados con los Decretos Supremos N° 002-2008-MINAM y la modificatoria el Decreto supremo N° 015-2015-MINAM

- **Demanda Biológica de Oxígeno (DBO)**

En la tabla 8 se observa que el DBO final fue 12.38 mg/l, encontrándose dentro del rango establecido por el ambos Decretos Supremos (002-2008-MINAM y 015-2015-MINAM), considerándose un valor máximo de 15 mg/l, tanto para el riego de vegetales de tallo alto y bajo como para la bebida de animales. Siendo así que el humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal, es adecuado en la remoción de la materia orgánica, considerándose apta para el regadío de pastizales.

- **Demanda Química de Oxígeno (DQO)**

De acuerdo al resultado final la DQO fue de 30.45 mg/l, demostrando que está por debajo de ambos decretos supremos (002-2008-MINAM y 015-2015-MINAM), siendo su rango máximo 40 mg/l para ambos (tabla 8). Esto demuestra que el sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas mediante humedales artificiales fue exitoso. Concluyendo que dicha agua se puede utilizar para los pastizales.

- **Nitrógeno Total**

Para el caso del nitrógeno total se obtuvo un resultado de 6.27 mg/l, y en el Decreto Supremo N° 002-2008-MINAM su rango máximo es de 10 mg/l para riego de vegetales de Tallo Alto y Tallo Bajo, y de 50 mg/l para bebida de animales; en cambio en la modificatoria el Decreto Supremo N° 015-2015-MINAM su rango es más alto ya que tanto para el riego de vegetales de tallo alto y bajo, y para la bebida de animales su concentración máxima es de 100

mg/l; demostrando así que este parámetros se encuentra dentro de los rangos establecidos y pueden ser utilizados para ambas finalidades (tabla 8).

La considerable reducción de este parámetro se debió a que las plantas de papiro absorbieron gran cantidad de dicho parámetro, ya que es vital para su crecimiento debido a la gran cantidad de proteínas que contienen especialmente en forma de nitrato, el porcentaje que las plantas absorben del nitrógeno es un total del 20% (Muñoz, 2015).

- **Fósforo Total**

El fósforo total fue 0.49 mg/l, y en el Decreto Supremo N° 002-2008-MINAM su rango máximo es de 1 mg/l para riego de vegetales de Tallo Alto y Tallo Bajo, y de 2 mg/l para bebida de animales; en cambio en la modificatoria el Decreto Supremo N° 015-2015-MINAM su rango máximo para vegetales de Tallo Alto y Tallo Bajo también es de 1 mg/l y en esta modificatoria no presenta una concentración establecida para la bebida de animales; demostrando así que este parámetro se encuentra dentro del rango establecido por ambos decretos (tabla 8).

La considerable reducción se debe a que el lecho filtrante fue nuevo y las partículas de fósforo se adhirieron con facilidad, resultando un agua apta para ser utilizada en el regadío de pastizales, considerado como vegetales de tallo alto.

- **Turbidez**

Para este parámetro no existe valor en ninguno de los Decretos Supremos, tanto en el 002-2008-MINAM como en la modificatoria 015-2015-MINAM, pero a simple vista el color del agua de salida es aceptable ya que tuvo un color blanquizo, y según estudios demuestran

que la turbidez debe mantenerse en los rango de 18 a 25 UNT (Cárdenas, 2005). Concluyendo así que el agua puede ser utilizado en el regadío de vegetales de tallo alto, que en esta investigación son los pastizales.

- **Potencial de Hidrógeno (pH)**

En el parámetro físico pH se obtuvo un resultado estable ya que se encuentra dentro de los rangos establecidos por ambos decretos (002-1008-MINAM y 015-2015-MINAM) que indican 6.5-8.5, y se logró un pH de 6.5 (tabla 8). Lo cual indica que dicha agua residual es apta para el regadío de los pastizales. Pero se debe tener cuidado con el lecho filtrante ya que aporta alcalinidad al agua en forma de iones de carbonato y/o bicarbonato, y esto puede hacer que aumente el pH en el humedal (Ojeda, Romero, & Reyes, 2006).

- **Conductividad Eléctrica (CE)**

El rango establecido por el Decreto supremo 002-2208-MINAM, para regadío de vegetales de tallo alto y bajo es menor a 2000 us/cm, y para la bebida de animales es menor o igual a 5000 us/cm; en cambio en la Modificatoria el Decreto Supremo 015-2015-MINAM el rango para el regadío de vegetales de tallo alto y bajo es exactamente 2500 us/cm, y para la bebida de animales es 5000 us/cm (tabla 8). Por lo tanto, la conductividad eléctrica se encuentra dentro de ambos decretos ya que se obtuvo un valor de 370 us/cm, demostrando que es apta para ambas finalidades.

El resultado obtenido es considerable y se mantiene en los rangos establecidos, pero no fue lo esperado por humedales artificiales de flujo subsuperficial, esto se puede haber dado porque la arena no fue lavada antes de ser instalado al humedal, donde apporto con sales, disminuyendo así este parámetro.

- **Sólidos Disueltos Totales (SDT)**

La cantidad de sólidos disueltos totales en el agua residual fue 180 mg/l, en los decretos (002-2008-MINAM y 015-2015-MINAM) no existe un valor específico para este parámetro, pero estudios demuestran que el rango apto de SDT es de 150 a 200 mg/l, por lo tanto, dicha concentración es adecuada para ser aplicado en los pastizales.

Esta remoción se debe a que los sólidos son atrapados en los primeros metros del humedal, demostrando que los humedales artificiales de flujo subsuperficial son muy eficientes que los de flujo superficial o libre en la remoción de sólidos disueltos totales (Castelless, at., 2007).

- **Oxígeno Disuelto (OD)**

En el Decreto Supremo N° 002-2008 tanto para el regadío de vegetales de tallo alto y bajo como para la bebida de animales el valor no está bien especificado, ya que indica que tiene que ser mayor o igual a 4 mg para riego de vegetales y mayor a 5 mg para bebida de animales; en cambio en la Modificatoria el Decreto Supremo N° 015-2015 si da un valor específico que es 4 mg para riego de vegetales y 5 mg para la bebida de animales (tabla 8). Siendo así que el resultado de oxígeno disuelto si se encuentra de los rangos establecidos en ambos decretos. Considerándose un agua apta para ser utilizada en el propósito de regar los pastizales.

- **Temperatura**

Para este parámetro no existe valor en el Decreto Supremo N° 002-2008-MINAM, pero en la modificatoria el Decreto Supremo N° 015-2015-MINAM hay una simbología $\Delta 3$, lo que quiere decir que existe una variación de 3 grados Celsius respecto al promedio mensual

multianual del área evaluada; lo que indica que la temperatura 28.2°C puede variar a 25.2 °C como a 31.2 °C; aun así demuestra que es una temperatura óptima para la actividad microbiana, ya que esta debe encontrarse en los rangos de 12 °C a 35 °C para que exista un adecuado crecimiento de bacterias nitrificantes, desnitrificadores y degradadoras de materia orgánica (Romero, 2004), siempre influenciado por el tiempo de retención que en dicha investigación fue 7 días.

Cuando la temperatura alcanza los 50 °C la digestión aeróbica y la nitrificación se suspenden, debido al aumento de evaporación, disminución de solubilidad de oxígeno, aceleración de reacciones químicas y biológicas, que consumen el oxígeno produciendo olores desagradables por la producción de metano, ácido sulfhídrico y materia orgánica parcialmente oxidada (Londoño & Marín, 2009); en cambio cuando la temperatura es menor de 10 °C la digestión metanogénica es muy lenta, y a temperaturas de inferiores de 5 °C demoran la reacciones responsables de la remoción de la DBO y de nitrógeno donde la bacteria autotrófica nitrificante deja de operar (Orozco, 2010).

Concluyendo que el agua se encuentra apta para ser utilizado en el regadío de pastizales, el cual no va alterar el proceso de crecimiento de la planta.

- **Coliformes Totales**

En el Decreto supremo N° 002-2008-MINAM el rango máximo de Coliformes totales es 5000 NMP/100ml para riego de vegetales de tallo alto y bajo, y para la bebida de animales; en cambio en el la modificatoria el Decreto Supremo N° 015-2015-MINAM el rango máximo para riego de vegetales de tallo bajo y alto es de 1000 NMP/100 ml, y para la bebida de animales es 5000 NMP/100ml (tabla 8). Y el valor obtenido mediante los respectivos análisis fue de 4000 NMP/100ml, encontrándose dentro de lo establecido por el decreto 002-2008 para ambas

finalidad riego de vegetales y bebida de animales, pero en la modificatoria 015-2015, no se encuentra dentro del rango para riego de vegetales, esto se puede deber a que como los vegetales son comestibles (lechuga, tomate, apio, ajo entre otras), tienen que ser más rigurosos, ya que es uno de los principales factores que causan enfermedades gastrointestinales agudas, incluso puede provocar la muerte en niños y personas adultas, y daños severos al feto en mujeres gestantes.

Concluyendo que el agua tratada que sale del humedal se encuentra en condiciones aptas para el regadío de vegetales de tallo alto, que en esta investigación son los pastizales.

- **Coliformes Fecales**

Dicho parámetro se encuentra dentro de los rangos establecidos por ambos decretos (N°002-2008 y el N° 015-2015), ya que su valor máximo es de 1000 NMP/100ml, y el resultado obtenido es exactamente lo mismo (1000 NMP/100ml) (tabla 8). Concluyendo que el agua tratada que sale del humedal se encuentra en condiciones aptas para ser utilizado en el regadío de pastizales.

Tabla 8

Comparación de resultados del laboratorio, con el D.S N° 002-2008-MINAM y la Modificatoria el D.S N° 015-2015-MINAM

Parámetro	Resultados de Laboratorio	002-2008-MINAM		015-2015-MINAM	
		Riego de Cultivos de Tallo Alto y Bajo	Bebidas de Animales	Riego de Vegetales de Tallo Alto y Bajo	Bebidas de Animales
DBO₅	12.38 mg/l	15 mg/l	< = 15 mg/l	15 mg/l	15 mg/l
(DQO)	30.45 mg/l	40 mg/l	40 mg/l	40 mg/l	40 mg/l
Nitrógeno total	6.27 mg/l	10 mg/l	50 mg/l	100 mg/l	100 mg/l
Fósforo total	0.49 mg/l	1 mg/l	2 mg/l	1 mg/l	**
Turbidez	19.3 UNT				
pH	6.5 Unidad de pH	6.5 – 8.5	6.5 – 8.4	6.5 – 8.5	6.5 – 8.4
Conductividad Eléctrica	370 us/cm	< 2000	< = 5000	2500	5000
Sólidos disueltos totales	180 mg/l				
Temperatura	28.2 °C	---	---	Δ 3	Δ 3
Oxígeno Disuelto	4 mg	> = 4	> 5	4	5

Olor	Aceptable				
Coliformes Totales	4000 NMP/100 mL	<ul style="list-style-type: none"> • Vegetales de tallo bajo: 5000 • Vegetales de tallo alto: 5000 	5000	1000	5000
Coliformes fecales o Termotolerantes	1000 NMP/100 mL	<ul style="list-style-type: none"> • Vegetales de tallo bajo: 1000 • Vegetales de tallo alto: 2000 	1000	1000	1000

- **Δ3:** variación de 3 grados Celsius respecto al promedio mensual multianual del área evaluada.
- ****:** No presenta valor en ese parámetro para la sub categoría

4.5 Prueba de la normalidad de datos

Para proporcionar información con altas bases de confiabilidad de la normalidad de datos se empleó la prueba de Shapiro-Wilk, ya que es utilizado para comprobar si los datos han sido extraídos de una población normal y de un muestreo aleatorio; en esta prueba los parámetros a trabajar son la media y la desviación típica; dicha prueba es aplicable para muestras pequeñas las cuales son menores de 30 individuos o muestreos ($n < 30$).

- **Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)**

En la tabla 9 se observa que el P-valor de Shapiro-Wilk es 0.999999, siendo mayor que el P-valor (0.05), indicando que sí existe una distribución normal de datos del parámetro químico DBO. Asimismo, en el gráfico de Normal P-Plot (figura 34) se observa que los puntos experimentales se encuentran cerca de la línea roja, lo cual indica que los datos de la DBO siguen una distribución normal.

Tabla 9

Normalidad de datos mediante la Prueba de Shapiro-Wilk para el parámetro DBO

Variable	N	W	P
DBO	3	1.000000	0.999999

Nivel de significancia > 0.05

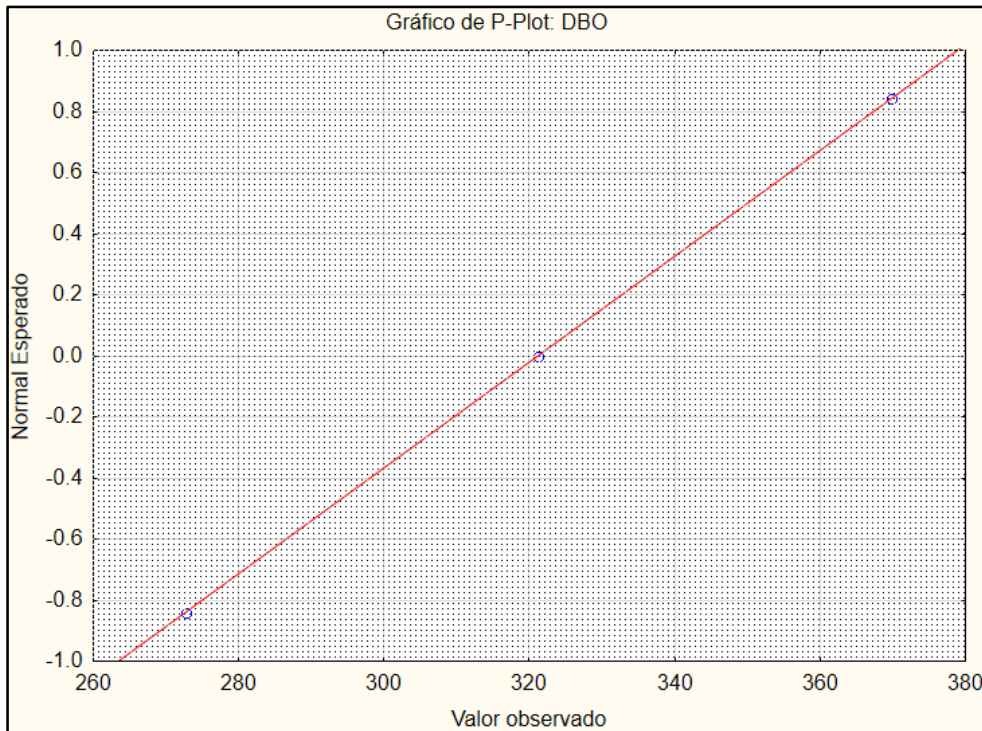


Figura 34. Gráfico de Normal P-Plot, para determinar la normalidad de datos del parámetro DBO

- **Demanda Química de Oxígeno (DQO)**

E la tabla 10 se observa que el P-valor de Shapiro-Wilk es 0.999999, siendo mayor que el P-valor (0.05), indicando que sí existe una distribución normal de los datos parámetro químico DQO. Asimismo, en el gráfico de Normal P-Plot (figura 35) se observa que los puntos experimentales se encuentran cerca de la línea roja, lo cual indica que los datos de la DBO siguen una distribución normal.

Tabla 10

Normalidad de datos mediante la Prueba de Shapiro-Wilk para el parámetro DQO

Variable	N	W	P
DQO	3	1.000000	0.999999

Nivel de significancia > 0.05

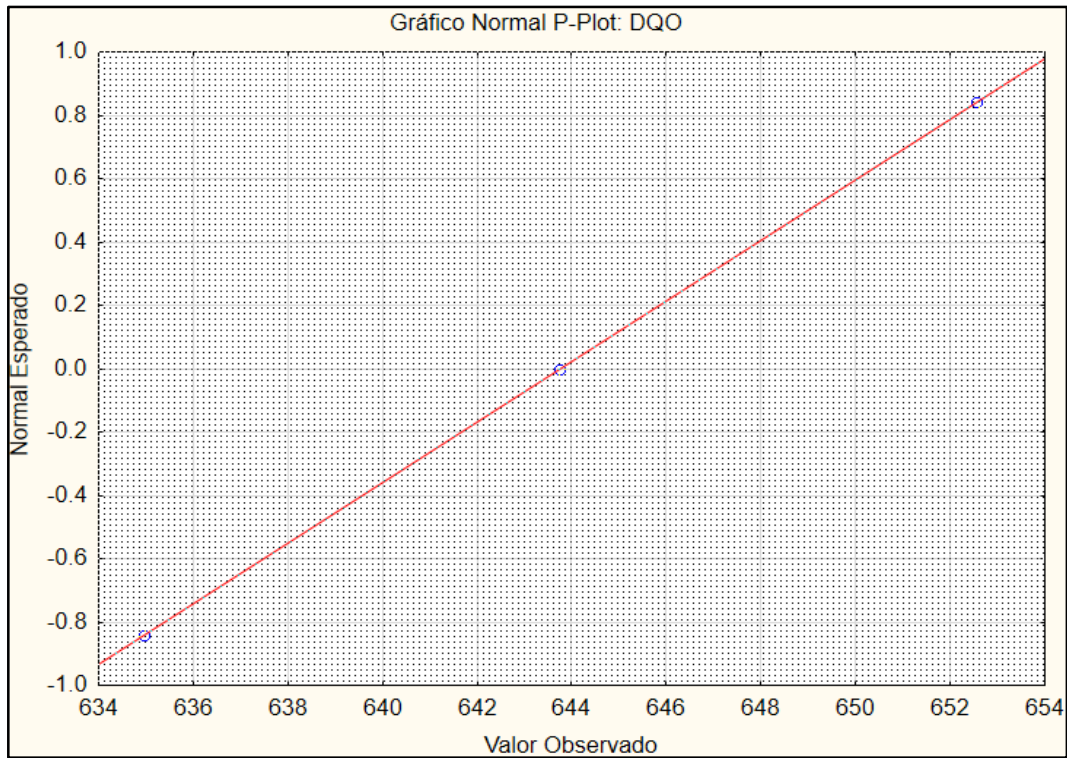


Figura 35. Gráfico de Normal P-Plot, para determinar la normalidad de datos del parámetro DQO

- **Nitrógeno Total**

En la tabla 11 se observa que el P-valor de Shapiro-Wilk es 0.999999, siendo mayor que el P-valor (0.05), indicando que sí existe una distribución normal de datos del parámetro químico nitrógeno total. Asimismo, en el gráfico de Normal P-Plot (figura 36) se observa que los puntos experimentales se encuentran cerca de la línea roja, lo cual indica que los datos del nitrógeno total siguen una distribución normal.

Tabla 11

Normalidad de datos mediante la Prueba de Shapiro-Wilk para el parámetro Nitrógeno Total

Variable	N	W	P
Nitrógeno total	3	1.000000	0.999999

Nivel de significancia > 0.05

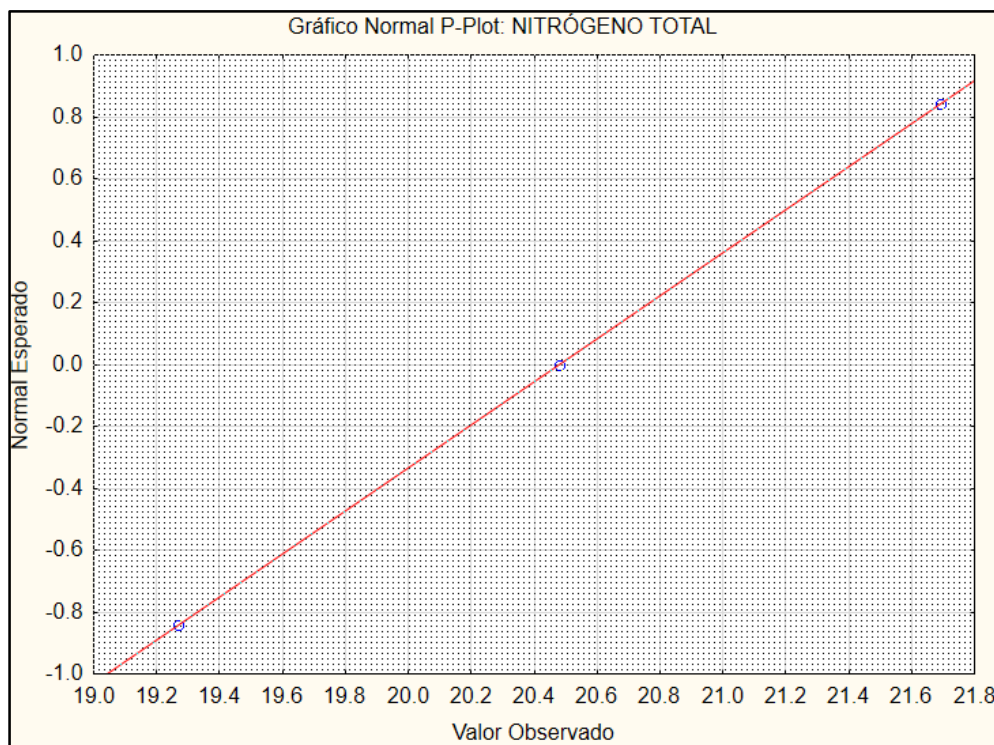


Figura 36. Gráfico de Normal P-Plot, para determinar la normalidad de datos del parámetro Nitrógeno Total

- **Fósforo Total**

En la tabla 12 se observa que el P-valor de Shapiro-Wilk es 0.999999, siendo mayor que el P-valor (0.05), indicando que sí existe una distribución normal de datos del parámetro químico fósforo total. Asimismo, en el gráfico de Normal P-Plot (figura 37) se observa que los puntos experimentales se encuentran cerca de la línea roja, lo cual indica que los datos del fósforo total siguen una distribución normal.

Tabla 12

Normalidad de datos mediante la Prueba de Shapiro-Wilk para el parámetro Fósforo Total

Variable	N	W	P
Fósforo total	3	1.000000	0.999999

Nivel de significancia > 0.05

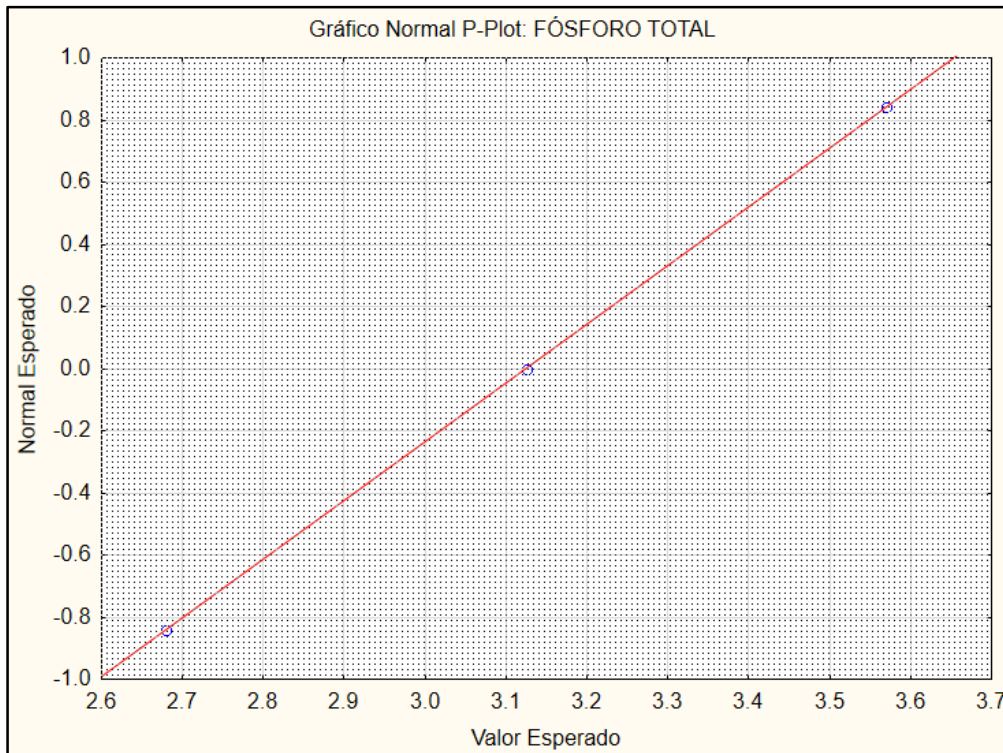


Figura 37. Gráfico de Normal P-Plot, para determinar la normalidad de datos del parámetro Fósforo Total

- **Turbidez**

En la tabla 13 se observa que el P-valor de Shapiro-Wilk es 0.999999, siendo mayor que el P-valor (0.05), indicando que sí existe una distribución normal de datos del parámetro físico turbidez. Asimismo, en el gráfico de Normal P-Plot (figura 38) se observa que los puntos experimentales se encuentran cerca de la línea roja, lo cual indica que los datos de la turbidez siguen una distribución normal.

Tabla 13

Normalidad de datos mediante la Prueba de Shapiro-Wilk para el parámetro Turbidez

Variable	N	W	P
Turbidez	3	1.000000	0.999999

Nivel de significancia > 0.05

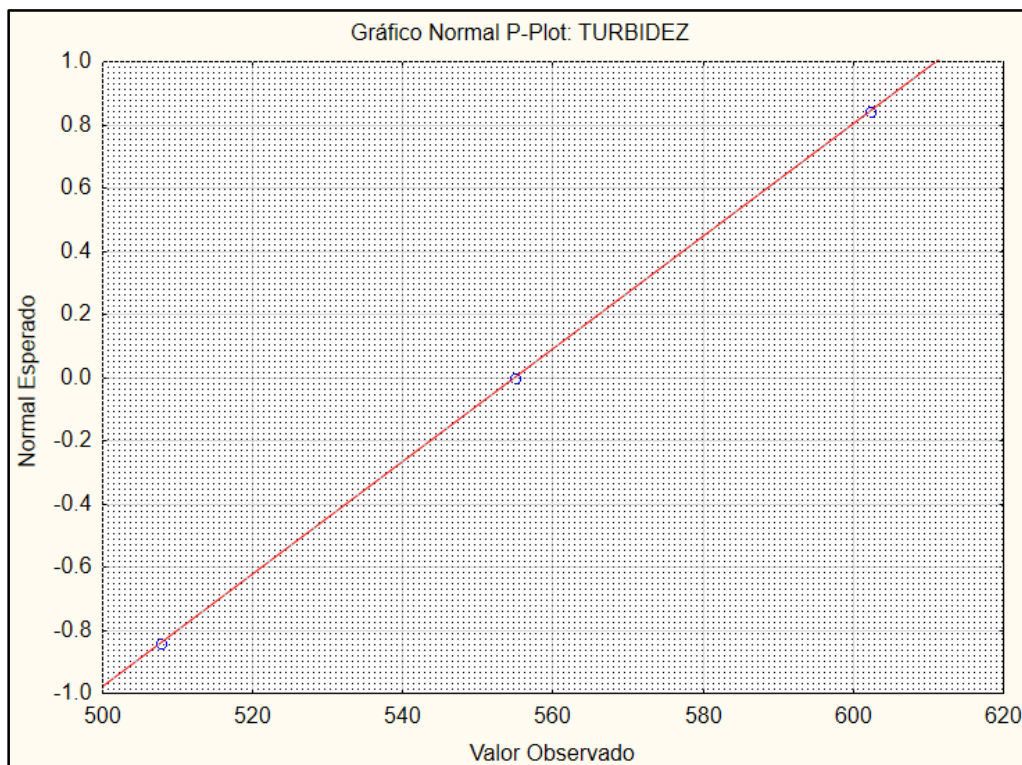


Figura 38. Gráfico de Normal P-Plot, para determinar la normalidad de datos del parámetro Turbidez

- **PH**

En la tabla 14 se observa que el P-valor de Shapiro-Wilk es 0.889855, siendo mayor que el P-valor (0.05), indicando que sí existe una distribución normal de datos del parámetro físico pH. Asimismo, en el gráfico de Normal P-Plot (figura 39) se observa que los puntos

experimentales se encuentran cerca de la línea roja, lo cual indica que los datos del pH siguen una distribución normal.

Tabla 14

Normalidad de datos mediante la Prueba de Shapiro-Wilk para el parámetro PH

Variable	N	W	P
pH	3	0.996678	0.889855

Nivel de significancia > 0.05

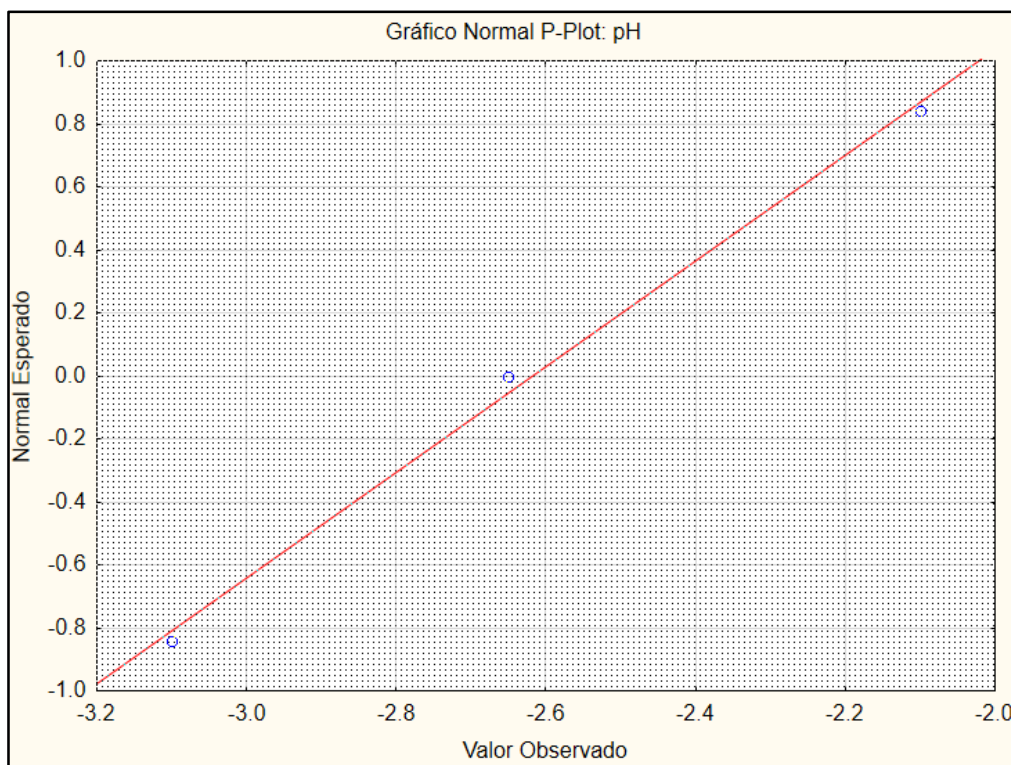


Figura 39. Gráfico de Normal P-Plot, para determinar la normalidad de datos del parámetro PH

- **Conductividad Eléctrica (CE)**

En la tabla 15 se observa que el P-valor de Shapiro-Wilk es 0.830803, siendo mayor que el P-valor (0.05), indicando que sí existe una distribución normal de datos del parámetro

físico conductividad eléctrica. Asimismo, en el gráfico de Normal P-Plot (figura 40) se observa que los puntos experimentales se encuentran cerca de la línea roja, lo cual indica que los datos de la conductividad eléctrica siguen una distribución normal.

Tabla 15

Normalidad de datos mediante la Prueba de Shapiro-Wilk para el parámetro CE

Variable	N	W	P
Conductividad eléctrica	3	0.992172	0.830803

Nivel de significancia > 0.05

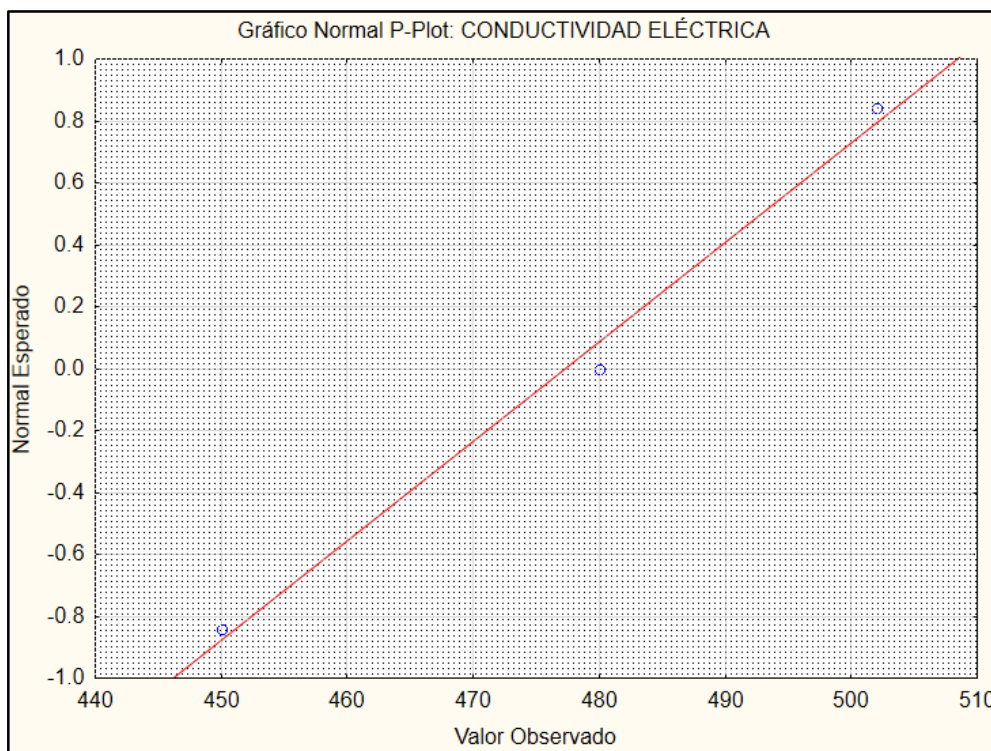


Figura 40. Gráfico de Normal P-Plot, para determinar la normalidad de datos del parámetro CE

- **Sólidos Disueltos Totales (SDT)**

En la tabla 16 se observa que el P-valor de Shapiro-Wilk es 0.999999, siendo mayor que el P-valor (0.05), indicando que sí existe una distribución normal de datos del parámetro físico sólidos disueltos totales. Asimismo, en el gráfico de Normal P-Plot (figura 41) se observa que los puntos experimentales se encuentran cerca de la línea roja, lo cual indica que los datos de los sólidos disueltos totales siguen una distribución normal.

Tabla 16

Normalidad de datos mediante la Prueba de Shapiro-Wilk para el parámetro SDT

Variable	N	W	P
Sólidos disueltos totales	3	1.000000	0.999999

Nivel de significancia > 0.05

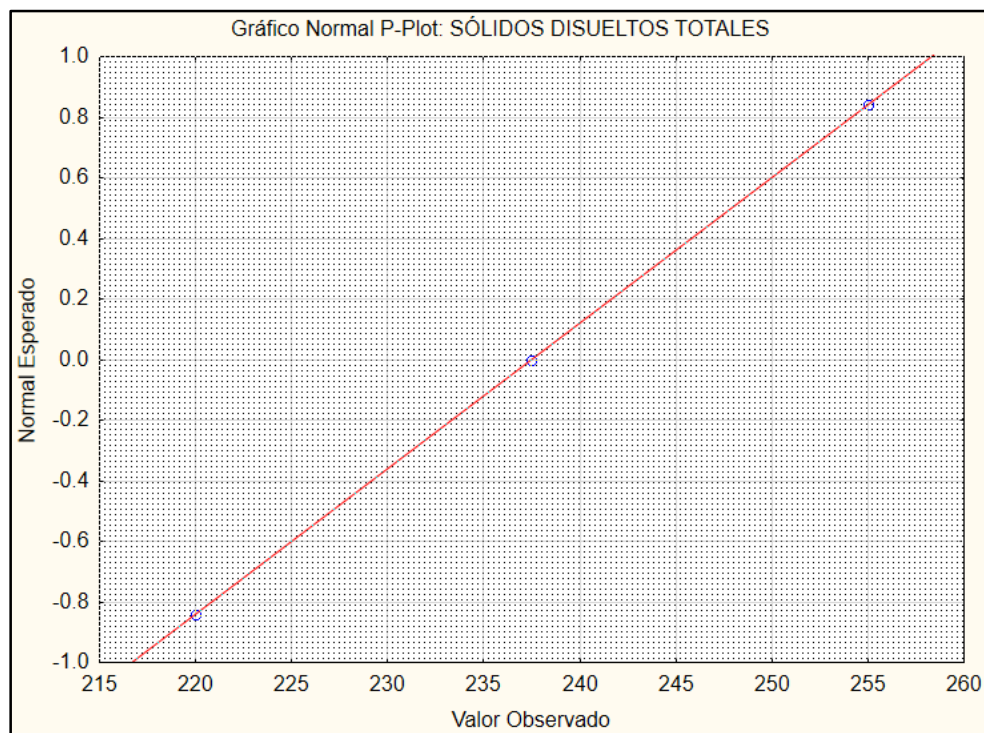


Figura 41. Gráfico de Normal P-Plot, para determinar la normalidad de datos del parámetro SDT

- **Temperatura**

En la tabla 17 se observa que el P-valor de Shapiro-Wilk es 0.999999, siendo mayor que el P-valor (0.05), indicando que sí existe una distribución normal de datos del parámetro físico temperatura. Asimismo, en el gráfico de Normal P-Plot (figura 42) se observa que los puntos experimentales se encuentran cerca de la línea roja, lo cual indica que los datos de la temperatura siguen una distribución normal.

Tabla 17

Normalidad de datos mediante la Prueba de Shapiro-Wilk para el parámetro Temperatura

Variable	N	W	P
Temperatura	3	1.000000	0.999999

Nivel de significancia > 0.05

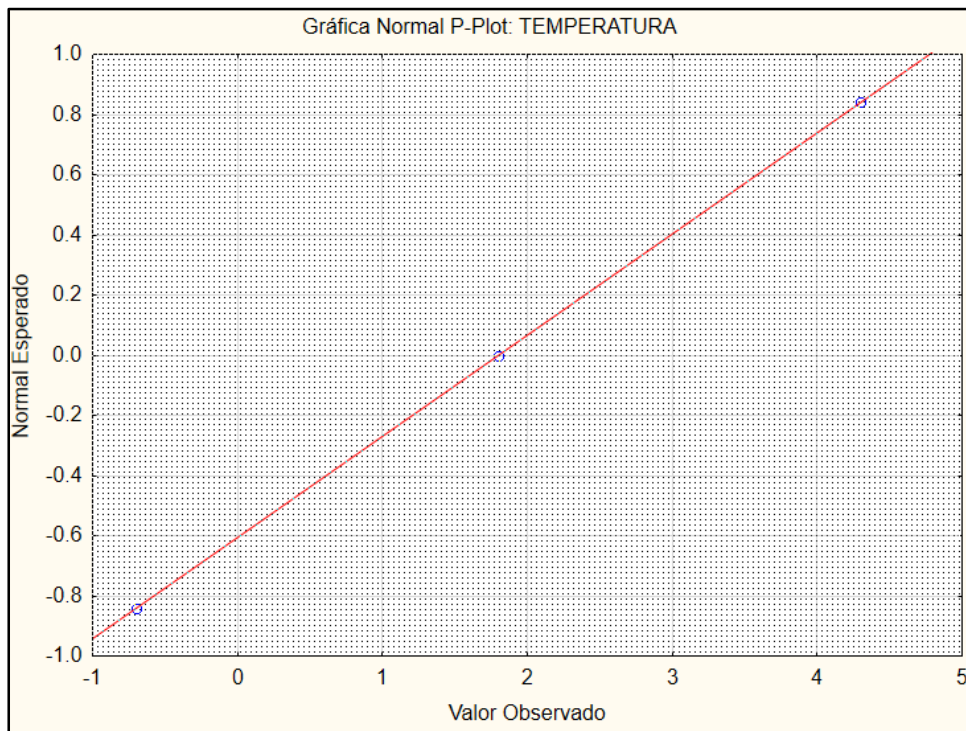


Figura 42. Gráfico de Normal P-Plot, para determinar la normalidad de datos del parámetro Temperatura

- **Oxígeno Disuelto (OD)**

En la tabla 18 se observa que el P-valor de Shapiro-Wilk es 0.999999, siendo mayor que el P-valor (0.05), indicando que sí existe una distribución normal de datos del parámetro físico oxígeno disuelto. Asimismo, en el gráfico de Normal P-Plot (figura 43) se observa que los puntos experimentales se encuentran cerca de la línea roja, lo cual indica que los datos del oxígeno disuelto siguen una distribución normal.

Tabla 18

Normalidad de datos mediante la Prueba de Shapiro-Wilk para el parámetro OD

Variable	N	W	P
Oxígeno disuelto	3	1.000000	0.999999

Nivel de significancia > 0.05

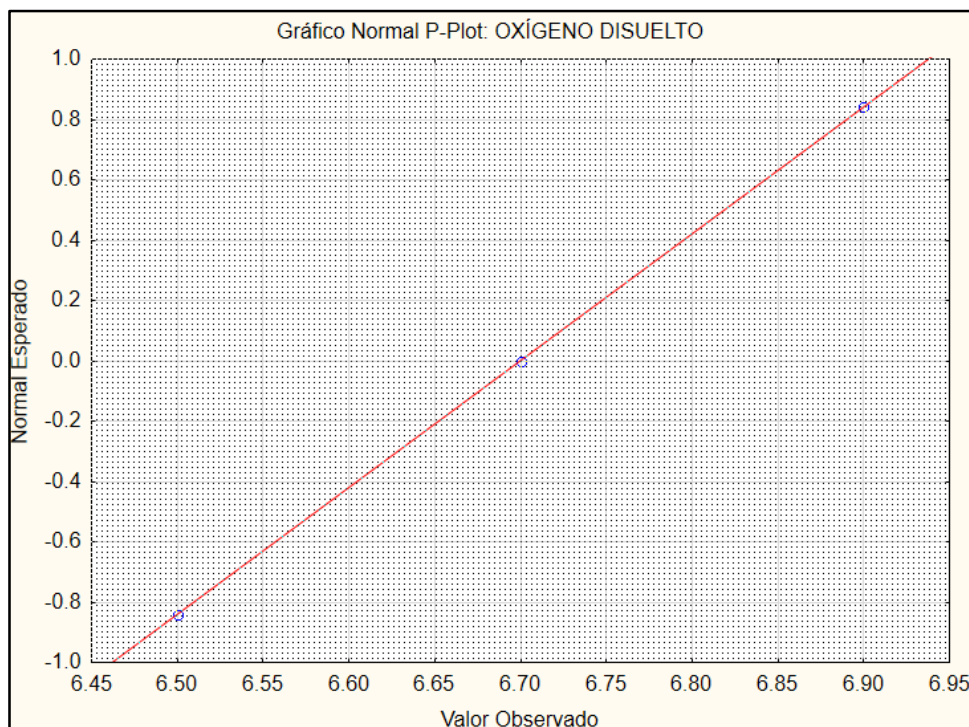


Figura 43. Gráfico de Normal P-Plot, para determinar la normalidad de datos del parámetro OD

- **Coliformes Totales**

En la tabla 19 se observa que el P-valor de Shapiro-Wilk es 0.999999, siendo mayor que el P-valor (0.05), indicando que sí existe una distribución normal de datos del parámetro microbiológico Coliformes totales. Asimismo, en el gráfico de Normal P-Plot (figura 44) se observa que los puntos experimentales se encuentran cerca de la línea roja, lo cual indica que los datos de los Coliformes totales siguen una distribución normal.

Tabla 19

Normalidad de datos mediante la Prueba de Shapiro-Wilk para el parámetro Coliformes Totales

Variable	N	W	P
Coliformes totales	3	1.000000	0.999999

Nivel de significancia > 0.05

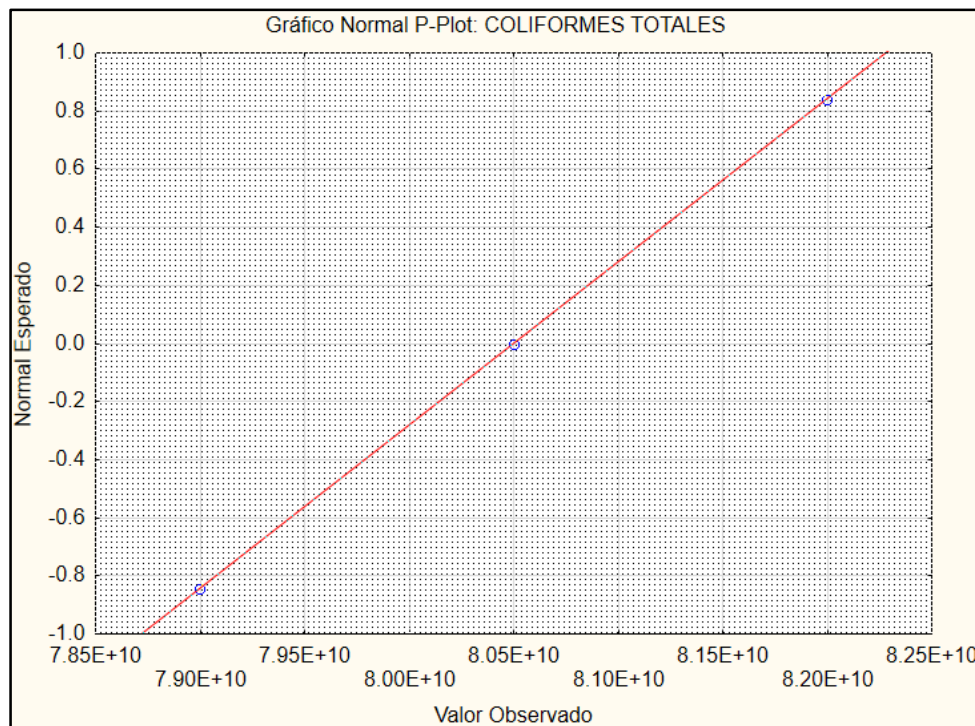


Figura 44. Gráfico de Normal P-Plot, para determinar la normalidad de datos del parámetro Coliformes Totales

- **Coliformes Termotolerantes o Fecales**

En la tabla 20 se observa que el P-valor de Shapiro-Wilk es 0.999999, siendo mayor que el P-valor (0.05), indicando que sí existe una distribución normal de datos del parámetro microbiológico Coliformes termotolerantes o fecales. Asimismo, en el gráfico de Normal P-Plot (figura 45) se observa que los puntos experimentales se encuentran cerca de la línea roja, lo cual indica que los datos de los Coliformes fecales siguen una distribución normal.

Tabla 20

Normalidad de datos mediante la Prueba de Shapiro-Wilk para el parámetro Coliformes Fecales

Variable	N	W	P
Coliformes fecales	3	1.000000	0.999999

Nivel de significancia > 0.05

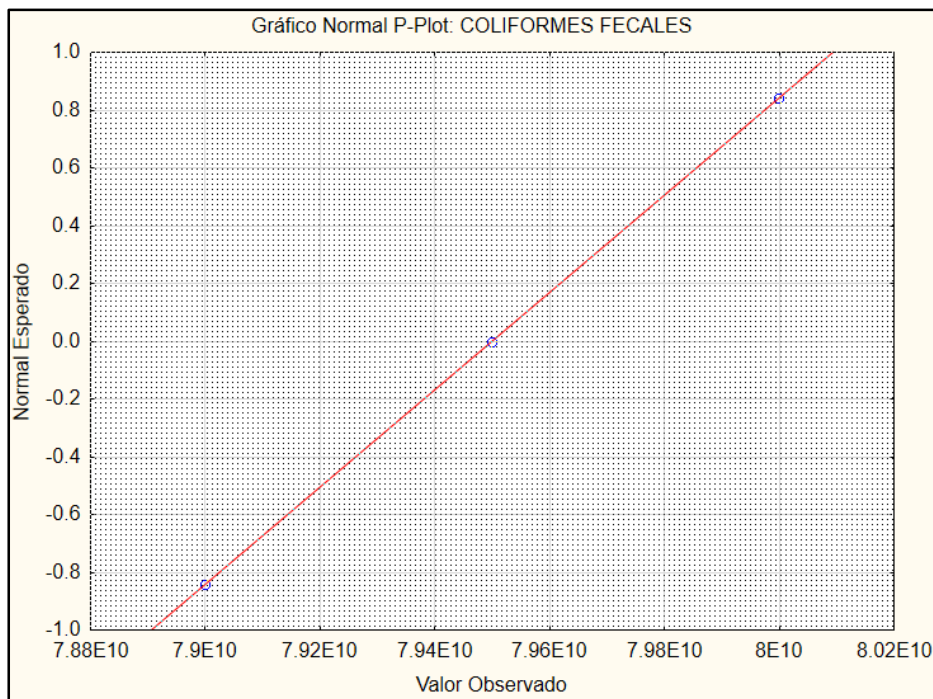


Figura 45. Gráfico de Normal P-Plot, para determinar la normalidad de datos del parámetro Coliformes Termotolerantes o Fecales

Debido a que todos los datos de los parámetros siguen una distribución normal, entonces se puede proceder a realizar un análisis de T-Student para muestras relacionadas para determinar si existe o no una diferencia significativa en la remoción de cada parámetro.

4.6 Análisis de T-STUDENT

4.6.1 Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅)

Como ya se determinó que los datos de la DBO₅ tienen una distribución normal, en primer lugar, se realizó la hipótesis de la diferencia de medias.

Hipótesis de diferencia de medias

Ho: No existe diferencia significativa entre el DBO₅ antes con el DBO₅ después.

Ha: Existe diferencia significativa entre DBO₅ antes con el DBO₅ después.

Las hipótesis resumidas estadísticamente para comprobar las diferencias de promedios del grupo en los momentos (antes y después) es:

$$\mathbf{Ho: } \mu^1 = \mu^2$$

$$\mathbf{Ha: } \mu^1 \neq \mu^2$$

O también se puede expresar así:

$$\mathbf{Ho: } \text{DBO}_5 \text{ antes} = \text{DBO}_5 \text{ después}$$

$$\mathbf{Ha: } \text{DBO}_5 \text{ antes} \neq \text{DBO}_5 \text{ después}$$

Estadística de prueba:

A la luz de las suposiciones, la estadística de prueba aprobada mediante la ecuación 1.

$$t = \frac{\bar{X}_d}{S_d / \sqrt{n}} \quad \Rightarrow \quad \bar{X}_d = \sum_1^n \frac{x_{i1} - x_{i2}}{n}$$

$$S_d = \sqrt{\frac{\sum_1^n (d_i - \bar{X}_d)^2}{n-1}} \quad (1)$$

Donde

\bar{X}_d = Media aritmética de las diferencias

S_d = Desviación estándar de las diferencias

n = Número de sujetos de la muestra

Distribución de la estadística de prueba:

La estadística de prueba está distribuida con la t de Student, considerando n-1 grados de libertad y 1- α de probabilidad.

Las condiciones respecto a la Ho, se detalla a continuación: se rechaza la Ho si el Pcalculado (sig.) es menor que el P-valor (0.05), indicando que existe una diferencia significativa entre un antes y un después; pero si se acepta la hipótesis nula, indica que no existe diferencia significativa entre un antes y un después.

Rechazar la Ho, sig < α (0.05)

Aceptar la Ho, sig > α (0.05)

Estadística utilizando STATISTICA

Los resultados de la tabla 21, muestra que la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅) antes de pasar por el sistema de tratamiento se obtuvo un promedio de 308.4 mg/l y una variabilidad de 83.70. Sin embargo, después que el ARD realizó el proceso de tratamiento, presentó resultados favorables con un promedio de 14.38 mg/l y una variabilidad de 8.93, demostrando

una reducción significativa debido a que el ARD pasó por un tratamiento primario (biodigestor) y un tratamiento secundario (HA). Siendo así que el sistema de tratamiento mediante humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal tuvo una eficiencia de remoción del 96%, demostrado su efectividad en el tratamiento de dichas aguas y encontrándose dentro del rango establecido (15 mg/l) por la modificatoria el Decreto supremo N° 015-2015-MINAM, siendo apta para ser aplicada en el regadío de vegetales de tallo alto, que en esta investigación son los pastizales.

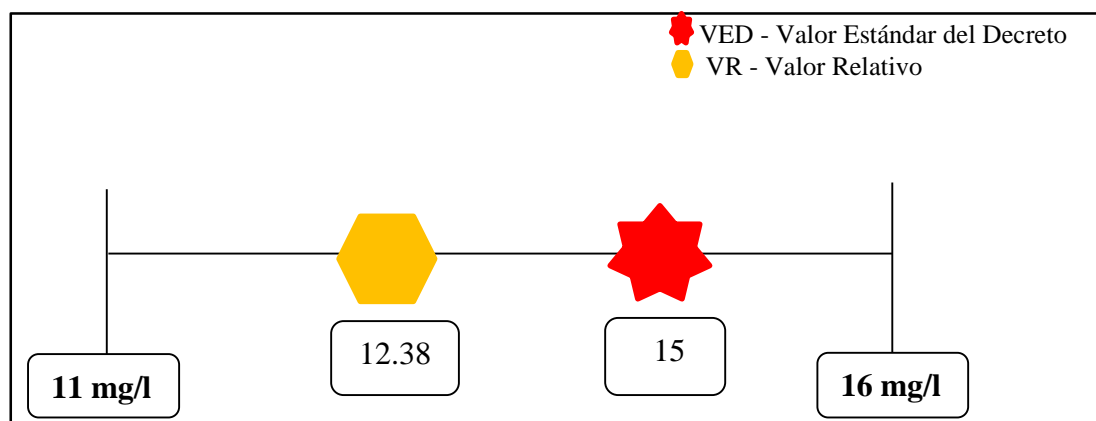
Asimismo, la media referencial y la media muestral de la DBO₅ están contenidas en el intervalo de confianza para medias (ver figura 46). Dichos datos fueron analizados con un nivel de confianza del 95%.

Tabla 21

Análisis de comparación de medias del parámetro DBO₅

Variable/ DBO₅	Media	N	Desviación tip.	Error de media
Antes	308.4	3	83.70	48.33
Después	14.38	3	8.93	5.12

Figura 46. Intervalo de confianza de la DBO₅



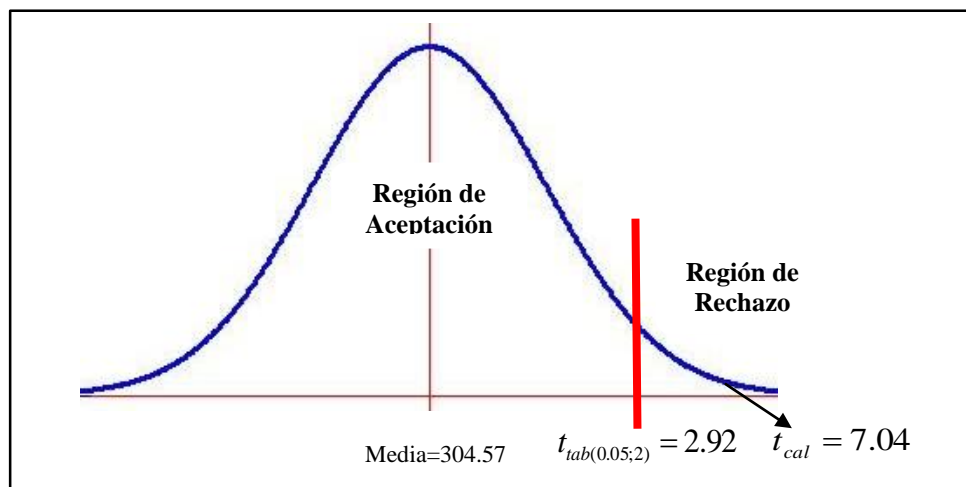
La prueba estadística de estudio, demuestra que existe suficiente evidencia para señalar que el promedio entre los resultados de la DBO₅ antes de ingresar al sistema de tratamiento mediante humedales artificiales se distingue notablemente con el promedio alcanzado después de ingresar al sistema de tratamiento en un 294.02 mg/l; además, el valor de prueba ($p < 0.05$) indica que las diferencias de los promedios son significativas, debido a que sig que vendría ser el Pcalculado es menor (0.019) a 0.05, resultado que permite rechazar la hipótesis nula, demostrando que la DBO₅ fue removido por el sistema de tratamiento mediante humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (ver tabla 22).

Tabla 22

Prueba de T-Student de muestras relacionadas del parámetro DBO₅.

Variable DBO ₅	Diferencias relacionadas				t	gl.	Sig.
	Media	Desviación Estándar	Error de la media	95% confianza Inferior Superior			
Antes- después	294.02	74.92	43.26	118.45 490.69	7.04	2	0.019

Figura 47. Campana de Gauss del análisis de la prueba T para muestras relacionadas del parámetro DBO₅.



Regla de decisión

Como el valor $t\text{-cal} = 7.04 < t\text{-tab} = 2.92$ y además el valor de P calculado (sig) es 0.019, siendo menor que el $\alpha = 0,05$, entonces se decide rechazar la hipótesis nula a favor de la alternativa.

Conclusión

La DBO_5 antes fue removida con una gran eficiencia en el sistema de tratamiento de humedales artificiales, obteniendo un agua residual con dicho parámetro apta para regadío de vegetales de tallo alto (pastizales).

4.6.2 Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Como ya se determinó que los datos de la DQO tienen una distribución normal, en primer lugar, se realizó la hipótesis de la diferencia de medias.

Hipótesis de diferencia de medias

Ho: No existe diferencia significativa entre la DQO antes y la DQO después.

Ha: Existe diferencia significativa entre la DQO antes y la DQO después.

Las hipótesis resumidas estadísticamente para comprobar las diferencias de promedios del grupo en los momentos (antes y después) es:

$$\mathbf{Ho: } \mu^1 = \mu^2$$

$$\mathbf{Ha: } \mu^1 \neq \mu^2$$

O también se puede expresar así:

Ho: DQO antes = DQO después

Ha: DQO antes \neq DQO después

Estadística de prueba:

A la luz de las suposiciones, la estadística de prueba aprobada mediante la ecuación 1.

$$t = \frac{\bar{X}_d}{S_d / \sqrt{n}} \quad \Rightarrow \quad \bar{X}_d = \sum_1^n \frac{X_{i1} - X_{i2}}{n}$$
$$S_d = \sqrt{\frac{\sum_1^n (d_i - \bar{X}_d)^2}{n-1}} \quad (1)$$

Donde

\bar{X}_d = Media aritmética de las diferencias

S_d = Desviación estándar de las diferencias

n = Número de sujetos de la muestra

Distribución de la estadística de prueba:

La estadística de prueba está distribuida con la t de Student, considerando n-1 grados de libertad y 1- α de probabilidad.

Las condiciones respecto a la Ho, se detalla a continuación: se rechaza la Ho si el Pcalculado (sig) es menor que el P-valor (0.05), indicando que existe una diferencia significativa entre un antes y un después; pero si se acepta la hipótesis nula, indica que no existe diferencia significativa entre un antes y un después.

Rechazar la Ho, sig < α (0.05)

Aceptar la Ho, sig > α (0.05)

Estadística utilizando STATISTICA

Los resultados de la tabla 23, muestra que la Demanda Química de Oxígeno (DQO) antes de pasar por el sistema de tratamiento se obtuvo un promedio de 694.20 mg/l y una variabilidad de 11.20. Sin embargo, después que el agua residual realizo el proceso de tratamiento en el sistema, presentó resultados favorables con un promedio de 35.65 mg/l y una variabilidad de 20.00, demostrando una reducción significativa debido a que el ARD pasó por un tratamiento primario (biodigestor) y un tratamiento secundario (HA). Siendo así que el sistema de tratamiento mediante humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal tuvo una eficiencia de remoción del 96%, demostrado su efectividad en el tratamiento de dichas aguas y encontrándose dentro del rango establecido (40 mg/l) por la modificatoria el Decreto supremo N° 015-2015-MINAM, siendo apta para ser aplicada en el regadío de vegetales de tallo alto, que en esta investigación son los pastizales.

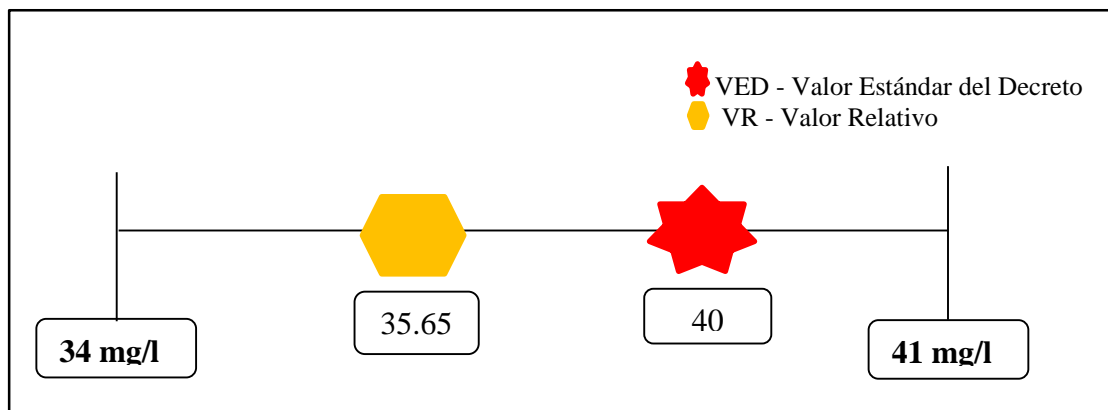
Asimismo, la media referencial y la media muestral de la DQO están contenidas en el intervalo de confianza para medias (ver figura 48). Dichos datos fueron analizados con un nivel de confianza del 95%.

Tabla 23

Análisis de comparación de medias del parámetro DQO

Variable/ DQO	Media	N	Desviación típica	Error de media
Antes	694.20	3	11.20	6.47
Después	35.65	3	20.00	11.55

Figura 48. Intervalo de confianza de la DQO



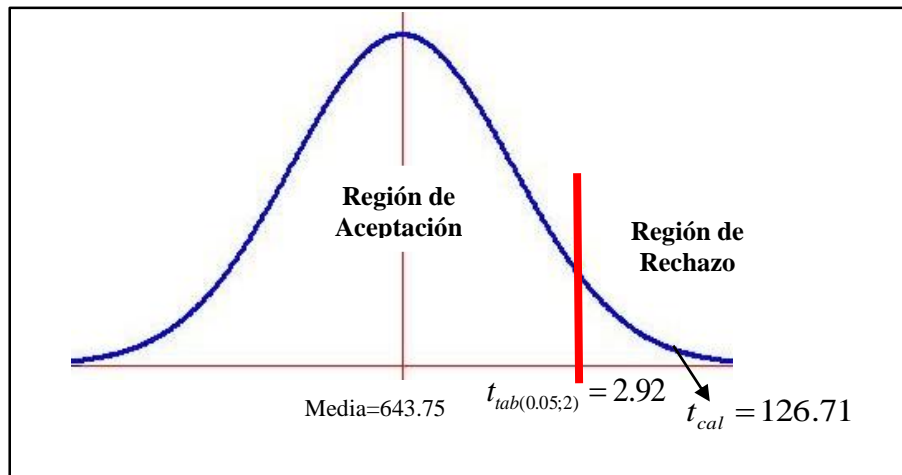
La prueba estadística de estudio, demuestra que existe suficiente evidencia para señalar que el promedio entre los resultados de la DQO antes de ingresar al sistema de tratamiento mediante humedales artificiales se distingue notablemente con el promedio alcanzado después de ingresar al sistema de tratamiento en un 658.55 mg/l; además, el valor de prueba ($p < 0.05$) indica que las diferencias de los promedios son significativas, debido a que sig que vendría ser el Pcalculado (sig) es menor (0.000) a 0.05, resultado que permite rechazar la hipótesis nula, demostrando que la DQO fue removido por el sistema de tratamiento mediante humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (ver tabla 24).

Tabla 24

Prueba de T-student de muestras relacionadas del parámetro DQO

Variable/ DQO	Diferencias relacionadas					t	gl.	Sig.
	Media	Desviación Estándar	Error de la media	95% confianza				
				Inferior	Superior			
Antes- después	658.55	8.80	5.08	621.89	665.61	126.71	2	0.000

Figura 49. Campana de Gauss del análisis de la prueba t para muestras relacionadas del parámetro DQO.



Regla de decisión

Como el valor $t_{cal} = 126.71 < t_{tab} = 2.92$ y además el valor de $P_{calculado}$ (sig) es 0.000, siendo menor que el $\alpha = 0,05$, entonces se decide rechazar la hipótesis nula a favor de la alternativa.

Conclusión

El parámetro químico Demanda Química de Oxígeno (DQO) antes fue removido con éxito en el sistema de tratamiento de humedales artificiales, obteniendo un agua residual con dicho parámetro apta para el regadío de pastizales.

4.6.3 Nitrógeno Total

Como ya se determinó que los datos del nitrógeno total tienen una distribución normal, en primer lugar, se realizó la hipótesis de la diferencia de medias.

Hipótesis de diferencia de medias

Ho: No existe diferencia significativa entre el Nitrógeno Total antes con el Nitrógeno Total después.

Ha: Existe diferencia significativa entre el Nitrógeno Total antes con el Nitrógeno Total después.

Las hipótesis resumidas estadísticamente para comprobar las diferencias de promedios del grupo en los momentos (antes y después) es:

$$\mathbf{Ho: } \mu^1 = \mu^2$$

$$\mathbf{Ha: } \mu^1 \neq \mu^2$$

O también se puede expresar así:

Ho: Nitrógeno Total antes = Nitrógeno Total después

Ha: Nitrógeno Total antes \neq Nitrógeno Total después

Estadística de prueba:

A la luz de las suposiciones, la estadística de prueba aprobada mediante la ecuación 1.

$$t = \frac{\bar{X}_d}{S_d / \sqrt{n}} \quad \Rightarrow \quad \bar{X}_d = \sum_1^n \frac{x_{i1} - x_{i2}}{n}$$
$$s_d = \sqrt{\frac{\sum_1^n (d_i - \bar{X}_d)^2}{n-1}} \quad (1)$$

Donde

\bar{X}_d = Media aritmética de las diferencias

S_d = Desviación estándar de las diferencias

n = Número de sujetos de la muestra

Distribución de la estadística de prueba:

La estadística de prueba está distribuida con la t de Student, considerando n-1 grados de libertad y $1 - \alpha$ de probabilidad.

Las condiciones respecto a la H_0 , se detalla a continuación: se rechaza la H_0 si el Pcalculado (sig) es menor que el P-valor (0.05), indicando que existe una diferencia significativa entre un antes y un después; pero si se acepta la hipótesis nula, indica que no existe diferencia significativa entre un antes y un después.

Rechazar la H_0 , sig < α (0.05)

Aceptar la H_0 , sig > α (0.05)

Estadística utilizando STATISTICA

Los resultados de la tabla 25, muestra que Nitrógeno Total antes de pasar por el sistema de tratamiento se obtuvo un promedio de 31.12 mg/l y una variabilidad de 3.94. Sin embargo, después que el agua residual realizó el proceso de tratamiento en el sistema, presentó resultados favorables con un promedio de 8.27 mg/l y una variabilidad de 5.00, demostrando una reducción significativa debido a que el ARD pasó por un tratamiento primario (biodigestor) y un tratamiento secundario (HA). Siendo así que el sistema de tratamiento mediante humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal tuvo una eficiencia de remoción del 78%, demostrado su efectividad en el tratamiento de dichas aguas y encontrándose dentro del rango establecido (10 mg/l) por la modificatoria el Decreto supremo N° 015-2015-MINAM, siendo apta para ser aplicada en el regadío de vegetales de tallo alto, que en esta investigación son los pastizales.

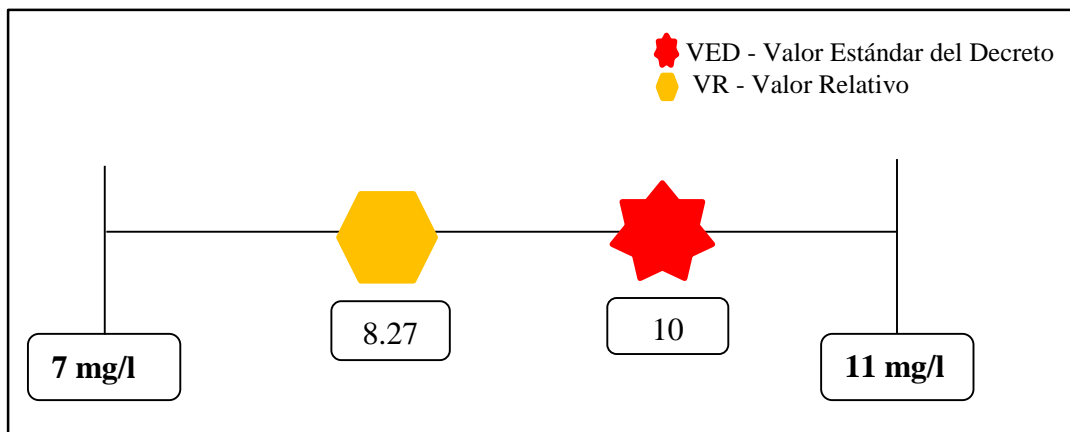
Asimismo, la media referencial y la media muestral del nitrógeno total están contenidas en el intervalo de confianza para medias (ver figura 50). Dichos datos fueron analizados con un nivel de confianza del 95%.

Tabla 25

Análisis de comparación de medias del parámetro Nitrógeno Total

Variable/ Nitrógeno total	Media	N	Desviación tip.	Error de media
Antes	31.12	3	3.94	2.28
Después	8.27	3	5.00	2.89

Figura 50. Intervalo de confianza del nitrógeno total



La prueba estadística de estudio, demuestra que existe suficiente evidencia para señalar que el promedio entre los resultados del nitrógeno total antes de ingresar al sistema de tratamiento mediante humedales artificiales se distingue notablemente con el promedio alcanzado después de ingresar al sistema de tratamiento en un 22.85 mg/l; además, el valor de prueba ($p < 0.05$) indica que las diferencias de los promedios son significativas, debido a que sig que vendría ser el Pcalculado es menor (0.002) a 0.05, resultado que permite rechazar la

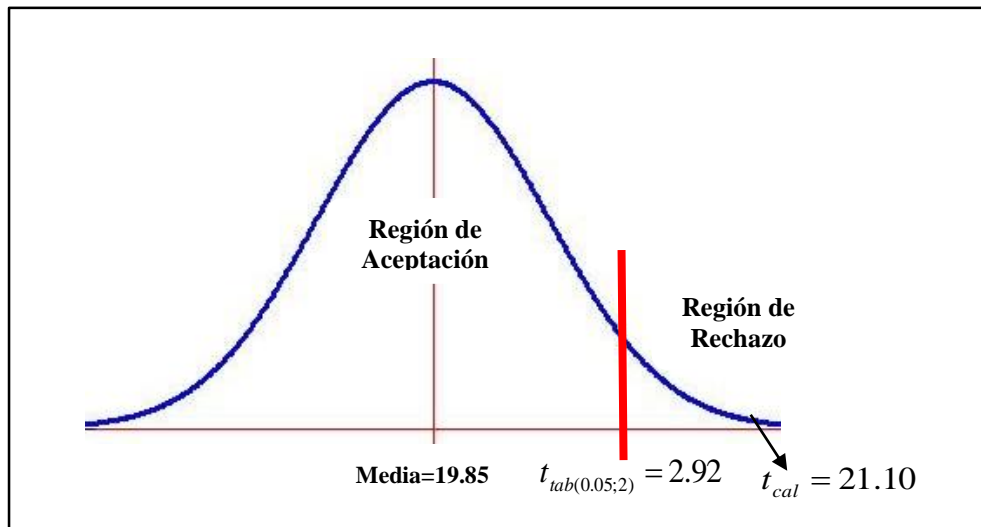
hipótesis nula, demostrando que el nitrógeno total fue removido por el sistema de tratamiento mediante humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (ver tabla 26).

Tabla 26

Prueba de T-student de muestras relacionadas del parámetro Nitrógeno Total

Variable/ Nitrógeno Total	Diferencias relacionadas					t	gl.	Sig.
	Media	Desviación Estándar	Error de la media	95% confianza				
				Inferior	Superior			
Antes- después	22.85	1.63	0.94	15.80	23.89	21.10	2	0.002

Figura 51. Campana de Gauss del análisis de la prueba t para muestras relacionadas del parámetro Nitrógeno Total



Regla de decisión

Como el valor $t_{cal} = 21.10 < t_{tab} = 2.92$ y además el valor de Pcalculado (sig) es 0.002, siendo menor que el $\alpha = 0,05$, entonces se decide rechazar la hipótesis nula a favor de la alternativa.

Conclusión

El parámetro químico Nitrógeno Total antes fue removido con éxito en el sistema de tratamiento de humedales artificiales, obteniendo un agua residual con dicho parámetro apta para ser utilizado en los pastizales.

4.6.4 Fósforo Total

Como ya se determinó que los datos del nitrógeno total tienen una distribución normal, en primer lugar, se realizó la hipótesis de la diferencia de medias.

Hipótesis de diferencia de medias

H₀: No existe diferencia significativa entre el fósforo total antes con el fósforo total después.

H_a: Existe diferencia significativa entre el fósforo total antes con el fósforo total después.

Las hipótesis resumidas estadísticamente para comprobar las diferencias de promedios del grupo en los momentos (antes y después) es:

$$\mathbf{H_0: \mu^1 = \mu^2}$$

$$\mathbf{H_a: \mu^1 \neq \mu^2}$$

O también se puede expresar así:

H₀: Fósforo Total antes = Fósforo Total después

H_a: Fósforo Total antes \neq Fósforo Total después

Estadística de prueba:

A la luz de las suposiciones, la estadística de prueba aprobada mediante la ecuación 1.

$$t = \frac{\bar{X}_d}{S_d / \sqrt{n}} \quad \Rightarrow \quad \bar{X}_d = \sum_1^n \frac{x_{i1} - x_{i2}}{n}$$

$$S_d = \sqrt{\frac{\sum_1^n (d_i - \bar{X}_d)^2}{n-1}} \quad (1)$$

Donde

\bar{X}_d = Media aritmética de las diferencias

S_d = Desviación estándar de las diferencias

n = Número de sujetos de la muestra

Distribución de la estadística de prueba:

La estadística de prueba está distribuida con la t de Student, considerando n-1 grados de libertad y 1- α de probabilidad.

Las condiciones respecto a la Ho, se detalla a continuación: se rechaza la Ho si el Pcalculado (sig) es menor que el P-valor (0.05), indicando que existe una diferencia significativa entre un antes y un después; pero si se acepta la hipótesis nula, indica que no existe diferencia significativa entre un antes y un después.

Rechazar la Ho, sig < α (0.05)

Aceptar la Ho, sig > α (0.05)

Estadística utilizando STATISTICA

Los resultados de la tabla 27, muestra que fósforo total antes de pasar por el sistema de tratamiento se obtuvo un puntaje promedio de 6.22 mg/l y una variabilidad de 1.72. Sin embargo, después que el agua residual realizo el proceso de tratamiento en el sistema, presentó

resultados favorables con un promedio de 0.87 mg/l y una variabilidad de 2.425, demostrando una reducción significativa debido a que el ARD pasó por un tratamiento primario (biodigestor) y un tratamiento secundario (HA). Siendo así que el sistema de tratamiento mediante humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal tuvo una eficiencia de remoción del 88%, demostrado su efectividad en el tratamiento de dichas aguas y encontrándose dentro del rango establecido (1 mg/l) por la modificatoria el Decreto supremo N° 015-2015-MINAM, siendo apta para ser aplicada en el regadío de vegetales de tallo alto, que en esta investigación son los pastizales.

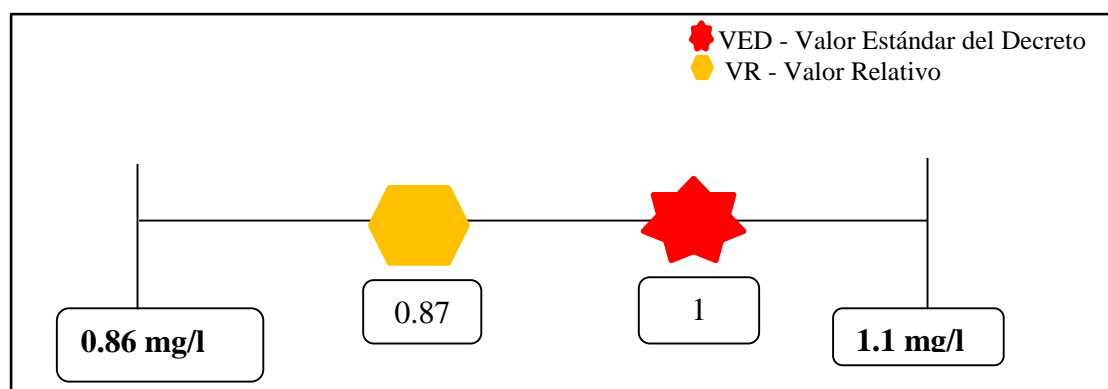
Asimismo, la media referencial y la media muestral del fósforo total están contenidas en el intervalo de confianza para medias (ver figura 52). Dichos datos fueron analizados con un nivel de confianza del 95%.

Tabla 27

Análisis de comparación de medias del parámetro Fósforo Total

Variable/ Fósforo Total	Media	N	Desviación tip.	Error de media
Antes	6.22	3	1.72	0.99
Después	0.87	3	2.425	1.40

Figura 52. Intervalo de confianza del Fósforo Total



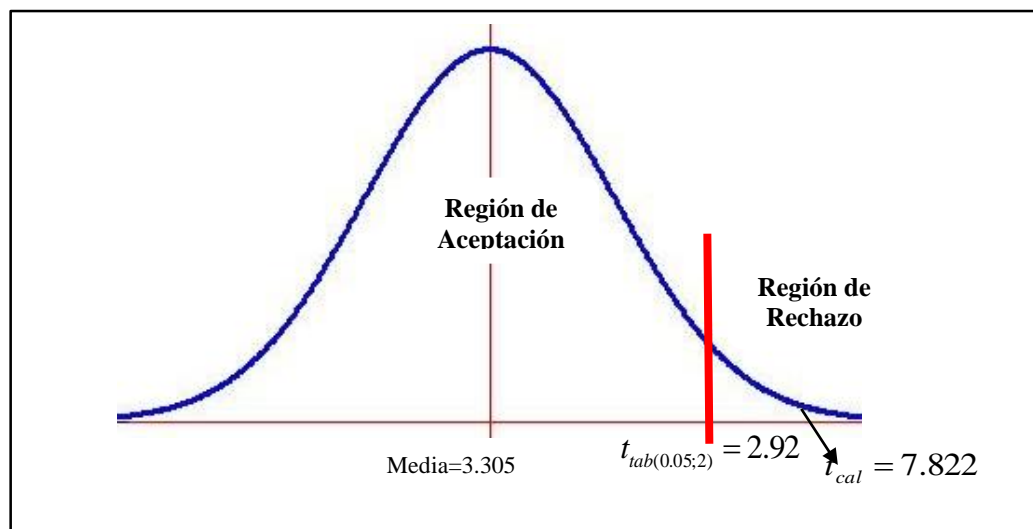
La prueba estadística de estudio, demuestra que existe suficiente evidencia para señalar que el promedio entre los resultados del nitrógeno total antes de ingresar al sistema de tratamiento mediante humedales artificiales se distingue notablemente con el promedio alcanzado después de ingresar al sistema de tratamiento en un 5.35 mg/l; además, el valor de prueba ($p < 0.05$) indica que las diferencias de los promedios son significativas, debido a que sig que vendría ser el Pcalculado es menor (0.002) a 0.05, resultado que permite rechazar la hipótesis nula, demostrando que el nitrógeno total fue removido por el sistema de tratamiento mediante humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (ver tabla 28).

Tabla 28

Prueba de T-student de muestras relacionadas del parámetro Fósforo Total

Variable/ Fósforo Total	Diferencias relacionadas				t	gl.	Sig.
	Media	Desviación Estándar	Error de la media	95% confianza Inferior Superior			
Antes-después	5.35	0.73	0.42	1.49 5.12	7.822	2	0.016

Figura 53. Campana de Gauss del análisis de la prueba t para muestras relacionadas del parámetro Fósforo Total



Regla de decisión

Como el valor $t\text{-cal} = 7.822 < t\text{-tab} = 2.92$ y además el valor de $P_{\text{calculado}}$ (sig) es 0.016, siendo menor que el $\alpha = 0,05$, entonces se decide rechazar la hipótesis nula a favor de la alternativa.

Conclusión

El parámetro químico Fósforo Total antes fue removido con éxito en el sistema de tratamiento de humedales artificiales, obteniendo un agua residual con dicho parámetro apta para regadío de pastizales.

4.6.5 Turbidez

Como ya se determinó que los datos de la turbidez tienen una distribución normal, en primer lugar, se realizó la hipótesis de la diferencia de medias.

Hipótesis de diferencia de medias

Ho: No existe diferencia significativa entre la turbidez antes con la turbidez después.

Ha: Existe diferencia significativa entre la turbidez antes con la turbidez después.

Las hipótesis resumidas estadísticamente para comprobar las diferencias de promedios del grupo en los momentos (antes y después) es:

$$\mathbf{Ho: } \mu^1 = \mu^2$$

$$\mathbf{Ha: } \mu^1 \neq \mu^2$$

O también se puede expresar así:

H₀: Turbidez antes = Turbidez después

H_a: Turbidez antes ≠ Turbidez después

Estadística de prueba:

A la luz de las suposiciones, la estadística de prueba aprobada mediante la ecuación 1.

$$t = \frac{\bar{X}_d}{S_d / \sqrt{n}} \quad \Rightarrow \quad \bar{X}_d = \sum_1^n \frac{x_{i1} - x_{i2}}{n}$$
$$S_d = \sqrt{\frac{\sum_1^n (d_i - \bar{X}_d)^2}{n-1}} \quad (1)$$

Donde

\bar{X}_d = Media aritmética de las diferencias

S_d = Desviación estándar de las diferencias

n = Número de sujetos de la muestra

Distribución de la estadística de prueba:

La estadística de prueba está distribuida con la t de Student, considerando n-1 grados de libertad y 1- α de probabilidad.

Las condiciones respecto a la H₀, se detalla a continuación: se rechaza la H₀ si el Pcalculado (sig) es menor que el P-valor (0.05), indicando que existe una diferencia significativa entre un antes y un después; pero si se acepta la hipótesis nula, indica que no existe diferencia significativa entre un antes y un después.

Rechazar la H₀, sig < α (0.05)

Aceptar la H₀, sig > α (0.05)

Estadística utilizando STATISTICA

Los resultados de la tabla 29, muestra que Turbidez antes de pasar por el sistema de tratamiento se obtuvo un puntaje promedio de 579.50 UNT y una variabilidad de 52.50. Sin embargo, después que el agua residual realizo el proceso de tratamiento en el sistema, presentó resultados favorables con un promedio de 22.45UNT y una variabilidad de 5.25, demostrando una reducción significativa debido a que el ARD pasó por un tratamiento primario (biodigestor) y un tratamiento secundario (HA). Siendo así que el sistema de tratamiento mediante humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal tuvo una eficiencia de remoción del 96%, demostrado su efectividad en el tratamiento de dichas aguas, en la modificatoria el Decreto supremo N° 015-2015-MINAM, no existe un valor establecido, pero a simple vista el color del agua es aceptable, ya que se obtuvo un color blanquizo, siendo apta para ser aplicada en el regadío de vegetales de tallo alto, que en esta investigación son los pastizales.

Asimismo, la media referencial y la media muestral del fósforo total están contenidas en el intervalo de confianza para medias (ver figura 54). Dichos datos fueron analizados con un nivel de confianza del 95%.

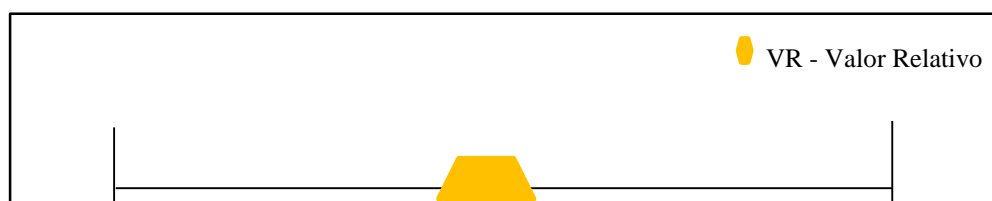
Tabla 29

Análisis de comparación de medias del parámetro Turbidez

Variable/ Turbidez	Media	N	Desviación tip.	Error de media
Antes	579.50	3	52.50	30.31
Después	22.45	3	5.25	3.03

Figura 54. Intervalo de confianza de la Turbidez

201



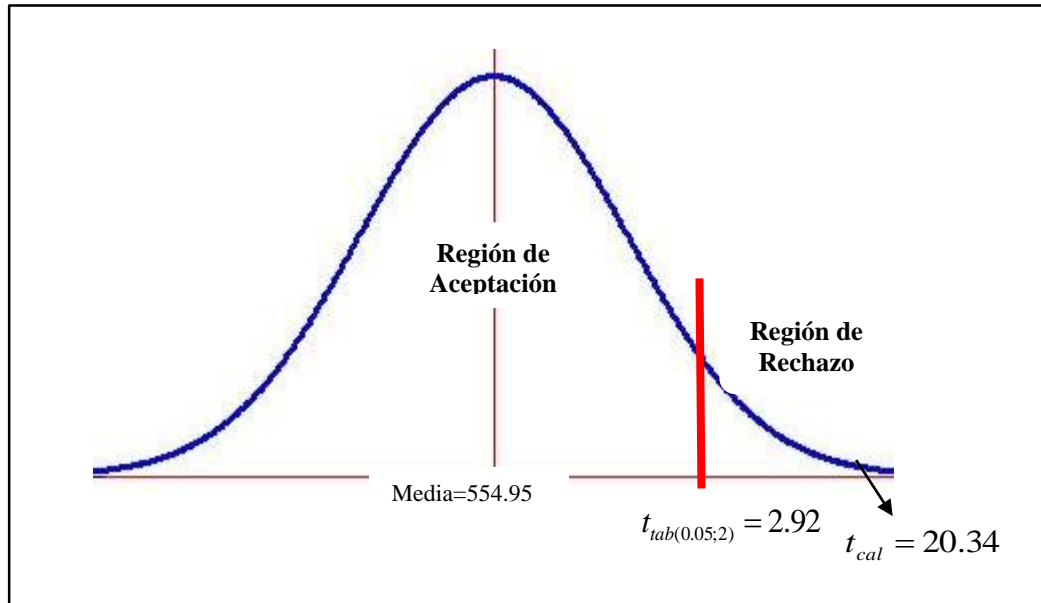
La prueba estadística de estudio, demuestra que existe suficiente evidencia para señalar que el promedio entre los resultados de la turbidez antes de ingresar al sistema de tratamiento mediante humedales artificiales se distingue notablemente con el promedio alcanzado después de ingresar al sistema de tratamiento en un 557.05 mg/l; además, el valor de prueba ($p < 0.05$) indica que las diferencias de los promedios son significativas, debido a que sig que vendría ser el Pcalculado es menor (0.002) a 0.05, resultado que permite rechazar la hipótesis nula, demostrando que la turbidez fue removido por el sistema de tratamiento mediante humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (ver tabla 30).

Tabla 30

Prueba de T-student de muestras relacionadas del parámetro Turbidez

Variable/ Turbidez	Diferencias relacionadas				t	gl.	Sig.
	Media	Desviación Estándar	Error de la media	<u>95% confianza</u> Inferior Superior			
Antes- después	557.05	47.25	27.28	437.57 672.32	20.34	2	0.002

Figura 55. Campana de Gauss del análisis de la prueba t para muestras relacionadas del parámetro Turbidez



Regla de decisión

Como el valor $t_{cal} = 20.34 < t_{tab} = 2.92$ y además el valor de $P_{calculado}$ (sig) es 0.002, siendo menor que el $\alpha = 0,05$, entonces se decide rechazar la hipótesis nula a favor de la alternativa.

Conclusión

El parámetro físico Turbidez antes fue removido con éxito en el sistema de tratamiento de humedales artificiales, obteniendo un agua residual con dicho parámetro apta para el regadío de pastizales.

4.6.6 Potencial de Hidrógeno (pH)

Como ya se determinó que los datos del pH tienen una distribución normal, en primer lugar, se realizó la hipótesis de la diferencia de medias.

Hipótesis de diferencia de medias

Ho: No existe diferencia significativa entre el pH antes con el pH después.

Ha: Existe diferencia significativa entre el pH antes y el pH después.

Las hipótesis resumidas estadísticamente para comprobar las diferencias de promedios del grupo en los momentos (antes y después) es:

$$\mathbf{Ho: } \mu^1 = \mu^2$$

$$\mathbf{Ha: } \mu^1 \neq \mu^2$$

O también se puede expresar así:

$$\mathbf{Ho: } \text{pH antes} = \text{pH después}$$

$$\mathbf{Ha: } \text{pH antes} \neq \text{pH después}$$

Estadística de prueba:

A la luz de las suposiciones, la estadística de prueba aprobada mediante la ecuación 1.

$$t = \frac{\bar{X}_d}{S_d / \sqrt{n}} \quad \Rightarrow \quad \begin{aligned} \bar{X}_d &= \sum_1^n \frac{X_{i1} - X_{i2}}{n} \\ S_d &= \sqrt{\frac{\sum_1^n (d_i - \bar{X}_d)^2}{n-1}} \end{aligned} \quad (1)$$

Donde

\bar{X}_d = Media aritmética de las diferencias

S_d = Desviación estándar de las diferencias

n = Número de sujetos de la muestra

Distribución de la estadística de prueba:

La estadística de prueba está distribuida con la t de Student, considerando n-1 grados de libertad y 1- α de probabilidad.

Las condiciones respecto a la H_0 , se detalla a continuación: se rechaza la H_0 si el $P_{\text{calculado}}$ (sig) es menor que el P -valor (0.05), indicando que existe una diferencia significativa entre un antes y un después; pero si se acepta la hipótesis nula, indica que no existe diferencia significativa entre un antes y un después.

Rechazar la H_0 , $\text{sig} < \alpha$ (0.05)

Aceptar la H_0 , $\text{sig} > \alpha$ (0.05)

Estadística utilizando STATISTICA

Los resultados de la tabla 31, muestra que pH antes de pasar por el sistema de tratamiento se obtuvo un puntaje promedio de 3.83 y una variabilidad de 0.55. Sin embargo, después que el agua residual realizó el proceso de tratamiento en el sistema, presentó resultados favorables con un promedio de 6.5 y una variabilidad de 0.05, demostrando una reducción significativa debido a que el ARD pasó por un tratamiento primario (biodigestor) y un tratamiento secundario (HA). Siendo así que el sistema de tratamiento mediante humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal tuvo una eficiencia de remoción del 68%, demostrado su efectividad en el tratamiento de dichas aguas y encontrándose dentro del rango establecido (6.5) por la modificatoria el Decreto supremo N° 015-2015-MINAM, siendo apta para ser aplicada en el regadío de vegetales de tallo alto, que en esta investigación son los pastizales.

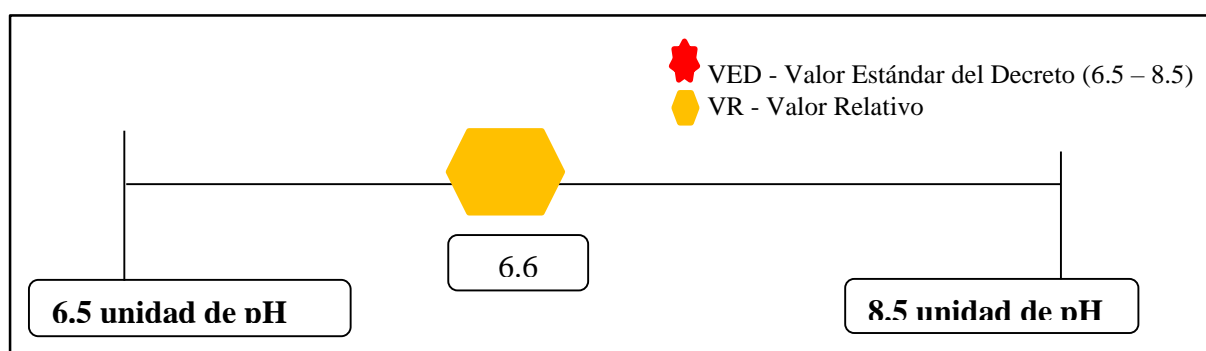
Asimismo, la media referencial y la media muestral del pH están contenidas en el intervalo de confianza para medias (ver figura 56), ya que el Decreto menciona rango entre 6.5 a 8.5. Dichos datos fueron analizados con un nivel de confianza del 95%.

Tabla 31

Análisis de comparación de medias del parámetro pH

Variable/ pH	Media	N	Desviación tip.	Error de media
Antes	3.83	3	0.55	0.32
Después	6.6	3	0.05	0.03

Figura 56. Intervalo de confianza del pH



La prueba estadística de estudio, demuestra que existe suficiente evidencia para señalar que el promedio entre los resultados del pH antes de ingresar al sistema de tratamiento mediante humedales artificiales se distingue notablemente con el promedio alcanzado después de ingresar al sistema de tratamiento en un 2.77; además, el valor de prueba ($p < 0.05$) indica que las diferencias de los promedios son significativas, debido a que sig que vendría ser el Pcalculado es menor (0.012) a 0.05, resultado que permite rechazar la hipótesis nula, demostrando que el pH vario al pasar por el sistema de tratamiento mediante humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (ver tabla 32).

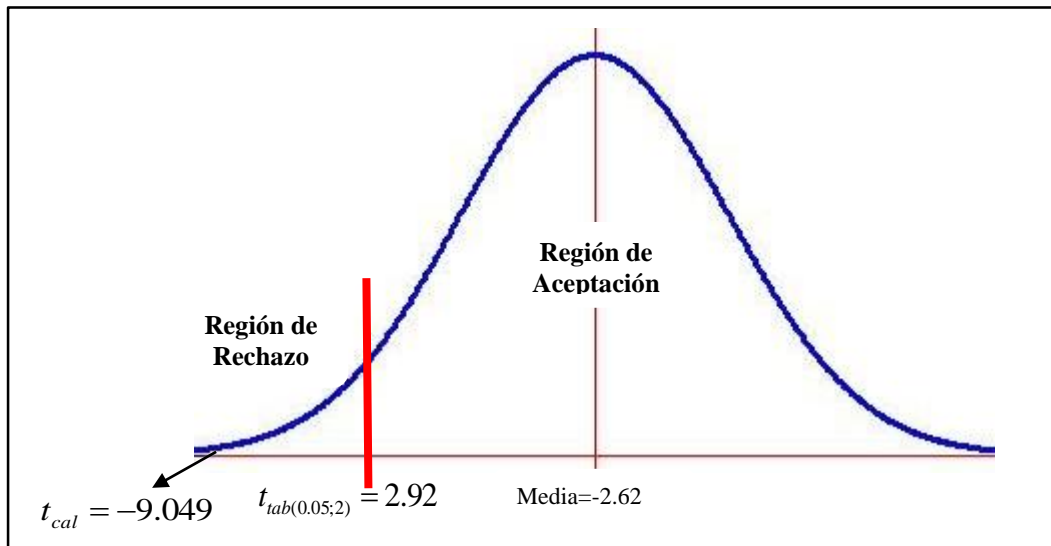
Tabla 32

Prueba de T-student de muestras relacionadas del parámetro pH

Variable/ pH	Diferencias relacionadas				t	gl.	Sig.
	Media	Desviación Estándar	Error de la media	95% confianza Inferior Superior			

Antes- después	-2.77	0.50	0.29	-3.86	-1.37	-9.049	2	0.012
---------------------------	-------	------	------	-------	-------	--------	---	-------

Figura 57. Campana de Gauss del análisis de la prueba t para muestras relacionadas del parámetro pH



Regla de decisión

Como el valor $t_{cal} = -9.049 < t_{tab} = -2.92$ y además el valor de P calculado (sig) es 0.002, siendo menor que el $\alpha = 0,05$, entonces se decide rechazar la hipótesis nula a favor de la alternativa.

Conclusión

El parámetro físico pH antes fue removido con éxito en el sistema de tratamiento de humedales artificiales, obteniendo un agua residual con dicho parámetro apta para el regadío de pastizales.

4.6.7 Conductividad Eléctrica (CE)

Como ya se determinó que los datos de la conductividad eléctrica tienen una distribución normal, en primer lugar, se realizó la hipótesis de la diferencia de medias.

Hipótesis de diferencia de medias

Ho: No existe diferencia significativa entre la conductividad eléctrica antes con la conductividad eléctrica después.

Ha: Existe diferencia significativa entre la conductividad eléctrica antes con la conductividad eléctrica después.

Las hipótesis resumidas estadísticamente para comprobar las diferencias de promedios del grupo en los momentos (antes y después) es:

$$\mathbf{Ho: } \mu^1 = \mu^2$$

$$\mathbf{Ha: } \mu^1 \neq \mu^2$$

O también se puede expresar así:

Ho: Conductividad Eléctrica antes = Conductividad Eléctrica después

Ha: Conductividad Eléctrica antes \neq Conductividad Eléctrica después

Estadística de prueba:

A la luz de las suposiciones, la estadística de prueba aprobada mediante la ecuación 1.

$$t = \frac{\bar{X}_d}{S_d / \sqrt{n}} \quad \Rightarrow \quad \bar{X}_d = \sum_1^n \frac{x_{i1} - x_{i2}}{n}$$

$$S_d = \sqrt{\frac{\sum_1^n (d_i - \bar{X}_d)^2}{n-1}} \quad (1)$$

Donde

\bar{X}_d = Media aritmética de las diferencias

S_d = Desviación estándar de las diferencias

n = Número de sujetos de la muestra

Distribución de la estadística de prueba:

La estadística de prueba está distribuida con la t de Student, considerando n-1 grados de libertad y 1- α de probabilidad.

Las condiciones respecto a la Ho, se detalla a continuación: se rechaza la Ho si el Pcalculado (sig) es menor que el P-valor (0.05), indicando que existe una diferencia significativa entre un antes y un después; pero si se acepta la hipótesis nula, indica que no existe diferencia significativa entre un antes y un después.

Rechazar la Ho, sig < α (0.05)

Aceptar la Ho, sig > α (0.05)

Estadística utilizando STATISTICA

Los resultados de la tabla 33, muestra una conductividad eléctrica antes de pasar por el sistema de tratamiento se obtuvo un puntaje promedio de 875 us/cm y una variabilidad de 55.00. Sin embargo, después que el agua residual realizo el proceso de tratamiento en el sistema, presentó resultados favorables con un promedio 395 us/cm y una variabilidad de 29.10, demostrando una reducción significativa debido a que el ARD pasó por un tratamiento primario (biodigestor) y un tratamiento secundario (HA). Siendo así que el sistema de tratamiento mediante humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal tuvo una eficiencia de remoción del 55%, demostrado su efectividad en el tratamiento de dichas aguas y encontrándose dentro del rango establecido (2500 us/cm) por la modificatoria el Decreto supremo N° 015-2015-MINAM, siendo apta para ser aplicada en el regadío de vegetales de tallo alto, que en esta investigación son los pastizales.

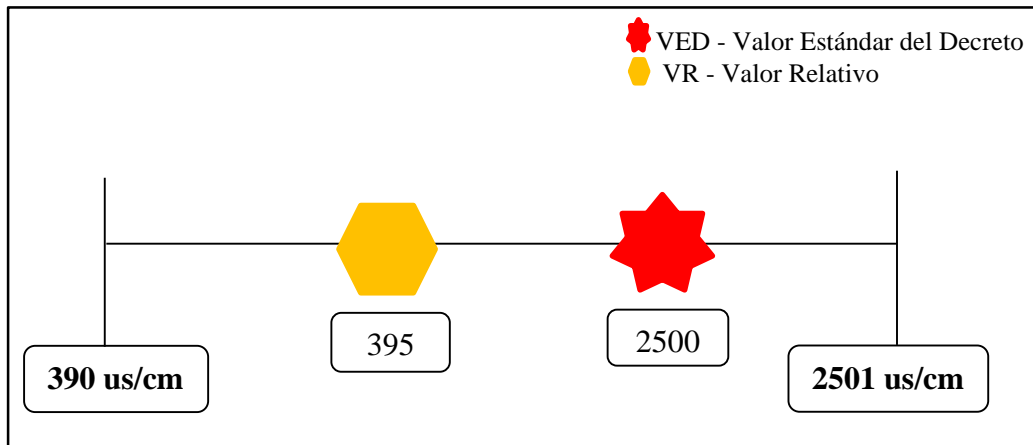
Asimismo, la media referencial y la media muestral del parámetro conductividad eléctrica están contenidas en el intervalo de confianza para medias (ver figura 58). Dichos datos fueron analizados con un nivel de confianza del 95%.

Tabla 33

Análisis de comparación de medias del parámetro CE

Variable/ CE	Media	N	Desviación tip.	Error de media
Antes	875	3	55.00	31.75
Después	395	3	29.10	16.79

Figura 58. Intervalo de confianza de la Conductividad Eléctrica



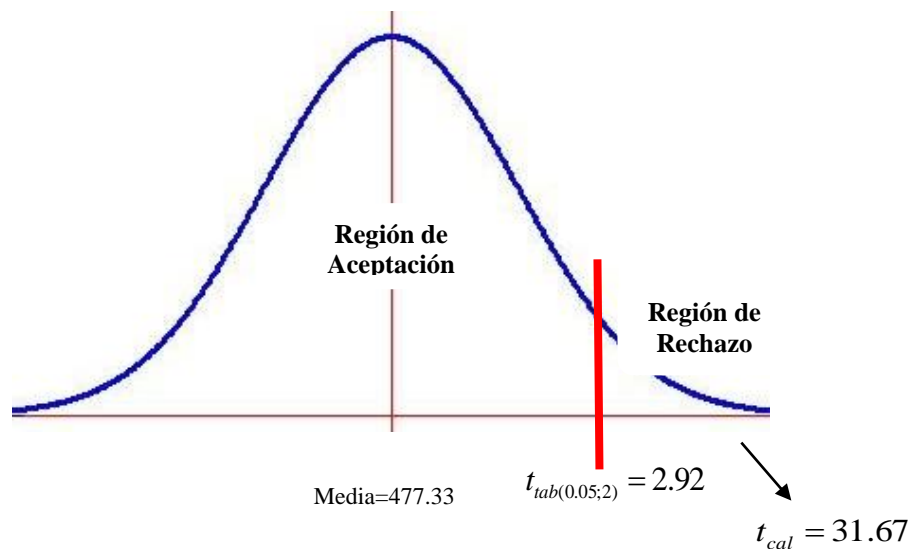
La prueba estadística de estudio, demuestra que existe suficiente evidencia para señalar que el promedio entre los resultados de la conductividad eléctrica antes de ingresar al sistema de tratamiento mediante humedales artificiales se distingue notablemente con el promedio alcanzado después de ingresar al sistema de tratamiento en un 480 us/cm; además, el valor de prueba ($p < 0.05$) indica que las diferencias de los promedios son significativas, debido a que sig que vendría ser el Pcalculado es menor (0.001) a 0.05, resultado que permite rechazar la hipótesis nula, demostrando que la conductividad eléctrica fue removido por el sistema de tratamiento mediante humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (ver tabla 34).

Tabla 34

Prueba de T-student de muestras relacionadas del parámetro CE

Variable/ CE	Diferencias relacionadas				T	gl.	Sig.
	Media	Desviación Estándar	Error de la media	95% confianza Inferior Superior			
Antes-después	480	26.10	15.07	412.49 542.18	31.67	2	0.001

Figura 59. Campana de Gauss del análisis de la prueba t para muestras relacionadas del parámetro CE



Regla de decisión

Como el valor $t_{cal} = 31.67 < t_{tab} = -2.92$ y además el valor de $P_{calculado}$ (sig) es 0.001, siendo menor que el $\alpha = 0,05$, entonces se decide rechazar la hipótesis nula a favor de la alternativa.

Conclusión

El parámetro físico conductividad eléctrica antes fue removido con éxito en el sistema de tratamiento de humedales artificiales, obteniendo un agua residual con dicho parámetro apta para ser utilizado en el regadío de pastizales.

4.6.8 Sólidos Disueltos Totales (SDT)

Como ya se determinó que los datos de los sólidos disueltos totales tienen una distribución normal, en primer lugar, se realizó la hipótesis de la diferencia de medias.

Hipótesis de diferencia de medias

Ho: No existe diferencia significativa entre los sólidos disueltos totales antes con los sólidos disueltos totales después.

Ha: Existe diferencia significativa entre los sólidos disueltos totales antes con los sólidos disueltos totales después.

Las hipótesis resumidas estadísticamente para comprobar las diferencias de promedios del grupo en los momentos (antes y después) es:

$$\mathbf{Ho: } \mu^1 = \mu^2$$

$$\mathbf{Ha: } \mu^1 \neq \mu^2$$

O también se puede expresar así:

Ho: Sólidos Disueltos Totales antes = Sólidos Disueltos Totales después

Ha: Sólidos Disueltos Totales antes \neq Sólidos Disueltos Totales después

Estadística de prueba:

A la luz de las suposiciones, la estadística de prueba aprobada mediante la ecuación 1.

$$t = \frac{\bar{X}_d}{S_d / \sqrt{n}} \quad \Rightarrow \quad \bar{X}_d = \sum_1^n \frac{x_{i1} - x_{i2}}{n}$$
$$S_d = \sqrt{\frac{\sum_1^n (d_i - \bar{X}_d)^2}{n-1}} \quad (1)$$

Donde

\bar{X}_d = Media aritmética de las diferencias

S_d = Desviación estándar de las diferencias

n = Número de sujetos de la muestra

Distribución de la estadística de prueba:

La estadística de prueba está distribuida con la t de Student, considerando n-1 grados de libertad y $1 - \alpha$ de probabilidad.

Las condiciones respecto a la H_0 , se detalla a continuación: se rechaza la H_0 si el Pcalculado (sig) es menor que el P-valor (0.05), indicando que existe una diferencia significativa entre un antes y un después; pero si se acepta la hipótesis nula, indica que no existe diferencia significativa entre un antes y un después.

Rechazar la H_0 , $\text{sig} < \alpha$ (0.05)

Aceptar la H_0 , $\text{sig} > \alpha$ (0.05)

Estadística utilizando STATISTICA

Los resultados de la tabla 35, muestra los sólidos disueltos totales antes de pasar por el sistema de tratamiento se obtuvo un puntaje promedio de 442.50 mg/l y una variabilidad de 24.54. Sin embargo, después que el agua residual realizo el proceso de tratamiento en el sistema, presentó resultados favorables con un promedio 198.00 mg/l y una variabilidad de 25.00 demostrando una reducción significativa debido a que el ARD pasó por un tratamiento primario (biodigestor) y un tratamiento secundario (HA). Siendo así que el sistema de tratamiento mediante humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal tuvo una eficiencia de remoción del 55%, demostrado su efectividad en el tratamiento de dichas aguas siendo apta para ser aplicada en el regadío de pastizales.

Asimismo, la media referencial y la media muestral de los SDT están contenidas en el intervalo de confianza para medias (ver figura 60). Ya que según estudios demuestran que se

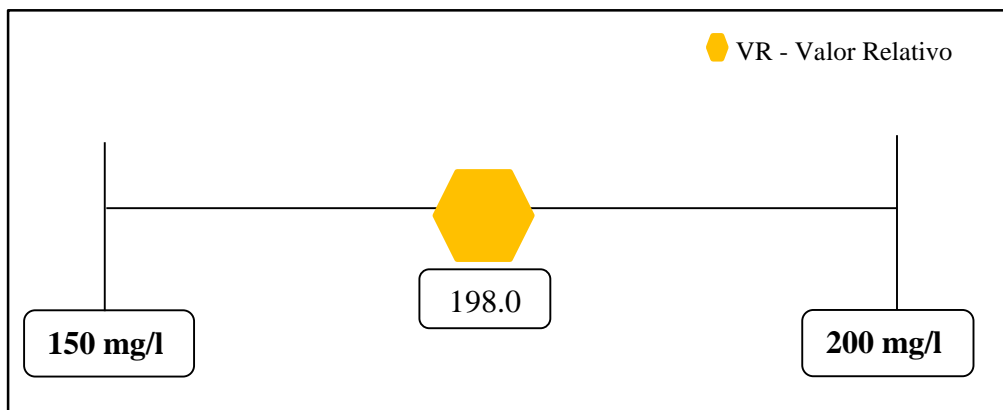
encuentran en los rangos de 150 a 200 mg/l. Dichos datos fueron analizados con un nivel de confianza del 95%.

Tabla 35

Análisis de comparación de medias del parámetro SDT

Variable/ SDT	Media	N	Desviación tip.	Error de media
Antes	442.50	3	42.50	24.54
Después	198.00	3	25.00	14.43

Figura 60. Intervalo de confianza de los SDT



La prueba estadística de estudio, demuestra que existe suficiente evidencia para señalar que el promedio entre los resultados de los sólidos disueltos totales antes de ingresar al sistema de tratamiento mediante humedales artificiales se distingue notablemente con el promedio alcanzado después de ingresar al sistema de tratamiento en un 244.50 mg/l; además, el valor de prueba ($p < 0.05$) indica que las diferencias de los promedios son significativas, debido a que sig que vendría ser el Pcalculado es menor (0.001) a 0.05, resultado que permite rechazar

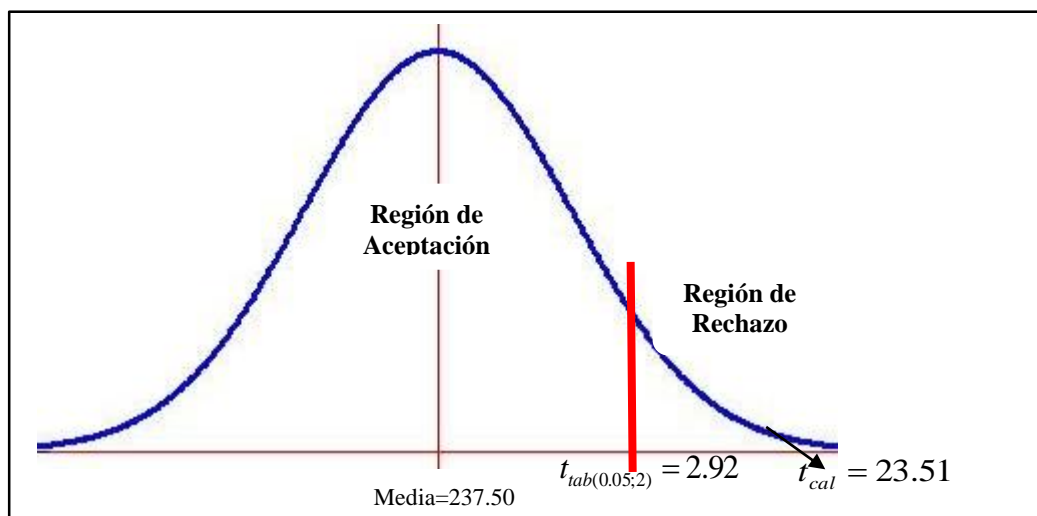
la hipótesis nula, demostrando que los sólidos disueltos totales fue removido por el sistema de tratamiento mediante humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (ver tabla 36).

Tabla 36

Prueba de T-student de muestras relacionadas del parámetro SDT

Variable/ SDT	Diferencias relacionadas					t	gl.	Sig.
	Media	Desviación Estándar	Error de la media	95% confianza				
				Inferior	Superior			
Antes- después	244.50	17.50	10.10	194.03	280.97	23.51	2	0.002

Figura 61. Campana de Gauss del análisis de la prueba t para muestras relacionadas del parámetro SDT



Regla de decisión

Como el valor $t_{cal} = 23.51 < t_{tab} = 2.92$ y además el valor de Pcalculado (sig) es 0.002, siendo menor que el $\alpha = 0,05$, entonces se decide rechazar la hipótesis nula a favor de la alternativa.

Conclusión

El parámetro físico sólidos disueltos totales antes fue removido con éxito en el sistema de tratamiento de humedales artificiales, obteniendo un agua residual con dicho parámetro apta para el regadío de pastizales.

4.6.9 Oxígeno Disuelto (OD)

Como ya se determinó que los datos del oxígeno disuelto tienen una distribución normal, en primer lugar, se realizó la hipótesis de la diferencia de medias.

Hipótesis de diferencia de medias

H₀: No existe diferencia significativa del Oxígeno Disuelto antes con el Oxígeno Disuelto después.

H_a: Existe diferencia significativa del Oxígeno Disuelto antes con el Oxígeno Disuelto después.

Las hipótesis resumidas estadísticamente para comprobar las diferencias de promedios del grupo en los momentos (antes y después) es:

$$\mathbf{H_0: \mu^1 = \mu^2}$$

$$\mathbf{H_a: \mu^1 \neq \mu^2}$$

O también se puede expresar así:

H₀: Oxígeno Disuelto antes = Oxígeno Disuelto después

H_a: Oxígeno Disuelto antes \neq Oxígeno Disuelto después

Estadística de prueba:

A la luz de las suposiciones, la estadística de prueba aprobada mediante la ecuación 1.

$$t = \frac{\bar{X}_d}{S_d / \sqrt{n}} \quad \Rightarrow \quad \bar{X}_d = \sum_1^n \frac{x_{i1} - x_{i2}}{n}$$

$$S_d = \sqrt{\frac{\sum_1^n (d_i - \bar{X}_d)^2}{n-1}} \quad (1)$$

Donde

\bar{X}_d = Media aritmética de las diferencias

S_d = Desviación estándar de las diferencias

n = Número de sujetos de la muestra

Distribución de la estadística de prueba:

La estadística de prueba está distribuida con la t de Student, considerando n-1 grados de libertad y 1- α de probabilidad.

Las condiciones respecto a la Ho, se detalla a continuación: se rechaza la Ho si el Pcalculado (sig) es menor que el P-valor (0.05), indicando que existe una diferencia significativa entre un antes y un después; pero si se acepta la hipótesis nula, indica que no existe diferencia significativa entre un antes y un después.

Rechazar la Ho, sig < α (0.05)

Aceptar la Ho, sig > α (0.05)

Los resultados de la tabla 37, muestra del oxígeno disuelto antes de pasar por el sistema de tratamiento se obtuvo un puntaje promedio de 11.95 mg y una variabilidad de 1.25. Sin embargo, después que el agua residual el proceso de tratamiento en el sistema, presentó resultados favorables con un promedio de 4.5 mg y una variabilidad de 1.05, demostrando una reducción significativa debido a que el ARD pasó por un tratamiento primario (biodigestor) y un tratamiento secundario (HA). Siendo así que el sistema de tratamiento mediante humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal tuvo una eficiencia de remoción del 61%, demostrado su efectividad en el tratamiento de dichas aguas y encontrándose dentro del rango establecido (4 mg) por la modificatoria el Decreto supremo N° 015-2015-MINAM, siendo apta para ser aplicada en el regadío de vegetales de tallo alto, que en esta investigación son los pastizales.

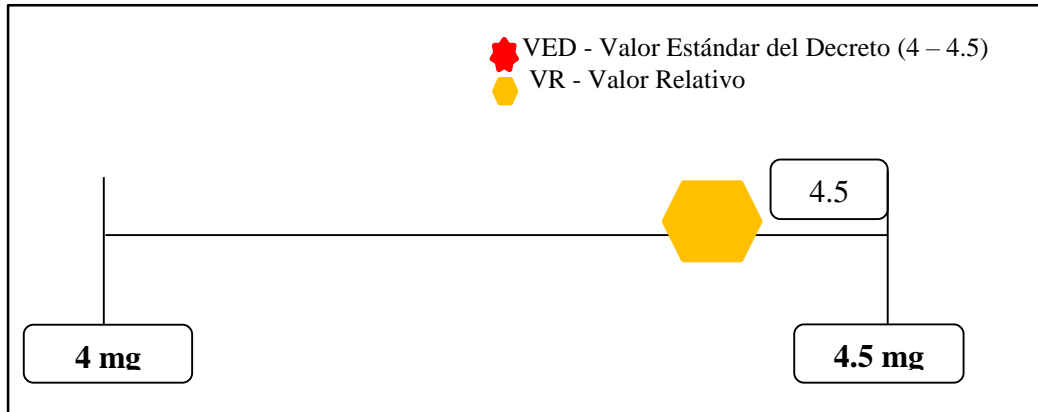
Asimismo, la media referencial y la media muestral del OD están contenidas en el intervalo de confianza para medias (ver figura 62). Dichos datos fueron analizados con un nivel de confianza del 95%.

Tabla 37

Análisis de comparación de medias del parámetro OD

Variable/ OD	Media	N	Desviación tip.	Error de media
Antes	11.95	3	1.25	0.72
Después	4.5	3	1.05	0.60

Figura 62. Intervalo de confianza del OD



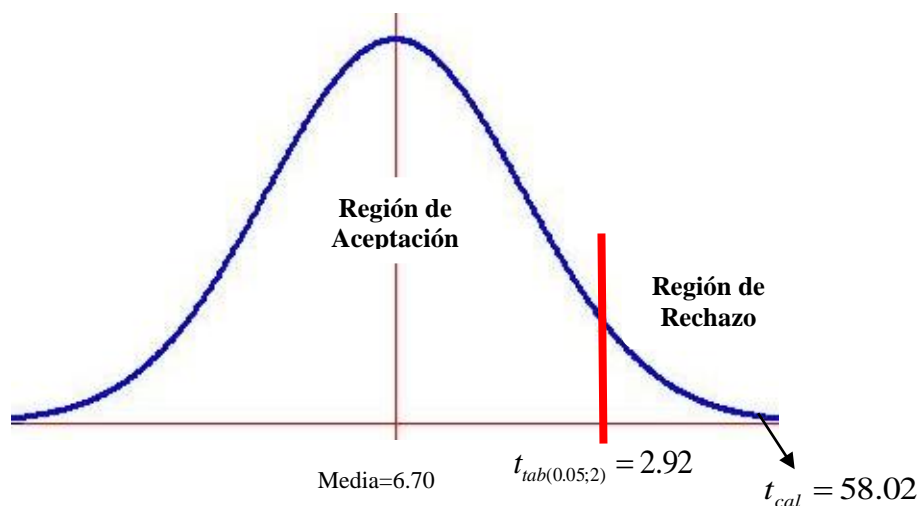
La prueba estadística de estudio, demuestra que existe suficiente evidencia para señalar que el promedio entre los resultados del oxígeno disuelto antes de ingresar al sistema de tratamiento mediante humedales artificiales se distingue notablemente con el promedio alcanzado después de ingresar al sistema de tratamiento en un 7.45 mg; además, el valor de prueba ($p < 0.05$) indica que las diferencias de los promedios son significativas, debido a que sig que vendría ser el Pcalculado es menor (0.000) a 0.05, resultado que permite rechazar la hipótesis nula, demostrando que el oxígeno disuelto fue removido por el sistema de tratamiento mediante humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (ver tabla 38).

Tabla 38

Prueba de T-student de muestras relacionadas del parámetro OD

Variable/ OD	Diferencias relacionadas					t	gl.	Sig.
	Media	Desviación Estándar	Error de la media	95% confianza				
				Inferior	Superior			
Antes- después	7.45	0.20	0.12	6.20	7.12	58.02	2	0.000

Figura 63. Campana de Gauss del análisis de la prueba t para muestras relacionadas del parámetro OD.



Regla de decisión

Como el valor $t_{cal} = 58.02 < t_{tab} = 2.92$ y además el valor de $P_{calculado}$ (sig) es 0.000 siendo menor que el $\alpha = 0,05$, entonces se decide rechazar la hipótesis nula a favor de la alternativa.

Conclusión

El parámetro físico oxígeno disuelto antes fue removido con éxito en el sistema de tratamiento de humedales artificiales, obteniendo un agua residual con dicho parámetro apta para el regadío de pastizales.

4.6.10 Temperatura

Como ya se determinó que los datos de la temperatura y demostró que tienen una distribución normal, en primer lugar, se realizó la hipótesis de la diferencia de medias.

Hipótesis de diferencia de medias

H₀: No existe diferencia significativa entre la temperatura antes con la temperatura después.

Ha: Existe diferencia significativa entre la temperatura antes con la temperatura después.

Las hipótesis resumidas estadísticamente para comprobar las diferencias de promedios del grupo en los momentos (antes y después) es:

$$\mathbf{Ho: } \mu^1 = \mu^2$$

$$\mathbf{Ha: } \mu^1 \neq \mu^2$$

O también se puede expresar así:

Ho: Temperatura antes = Temperatura después

Ha: Temperatura antes \neq Temperatura después

Estadística de prueba:

A la luz de las suposiciones, la estadística de prueba aprobada mediante la ecuación 1.

$$t = \frac{\bar{X}_d}{S_d / \sqrt{n}} \quad \Rightarrow \quad \bar{X}_d = \sum_1^n \frac{x_{i1} - x_{i2}}{n}$$
$$s_d = \sqrt{\frac{\sum_1^n (d_i - \bar{X}_d)^2}{n-1}} \quad (1)$$

Donde

\bar{X}_d = Media aritmética de las diferencias

S_d = Desviación estándar de las diferencias

n = Número de sujetos de la muestra

Distribución de la estadística de prueba:

La estadística de prueba está distribuida con la t de Student, considerando n-1 grados de libertad y 1- α de probabilidad.

Las condiciones respecto a la H_0 , se detalla a continuación: se rechaza la H_0 si el P calculado (sig) es menor que el P -valor (0.05), indicando que existe una diferencia significativa entre un antes y un después; pero si se acepta la hipótesis nula, indica que no existe diferencia significativa entre un antes y un después.

Rechazar la H_0 , $\text{sig} < \alpha$ (0.05)

Aceptar la H_0 , $\text{sig} > \alpha$ (0.05)

Estadística utilizando STATISTICA

Los resultados de la tabla 39, muestra de la temperatura antes de pasar por el sistema de tratamiento se obtuvo un puntaje promedio de 30.45 °C y una variabilidad de 2.95. Sin embargo, después que el agua residual realizó el proceso de tratamiento en el sistema, presentó resultados favorables con un promedio de 29.35 °C y una variabilidad de 0.45, demostrando una reducción significativa debido a que el ARD pasó por un tratamiento primario (biodigestor) y un tratamiento secundario (HA). Siendo así que el sistema de tratamiento mediante humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal tuvo una alta eficiencia de remoción, demostrado su efectividad en el tratamiento de dichas aguas y encontrándose dentro del rango establecido (± 3 °C) por la modificatoria el Decreto supremo N° 015-2015-MINAM, siendo apta para ser aplicada en el regadío de vegetales de tallo alto, que en esta investigación son los pastizales.

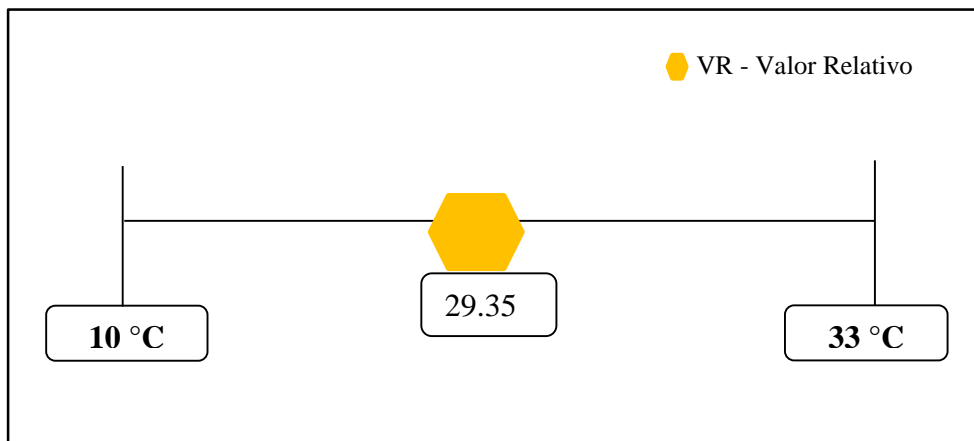
Asimismo, la media referencial y la media muestral de la temperatura están contenidas en el intervalo de confianza para medias (ver figura 64). Ya que según estudios demuestran que se encuentra en el rango de 12 a 35 °C; si en caso alcanza 50 °C la digestión aeróbica y la nitrificación se suspenden, en cambio cuando la temperatura es menor de 10 °C la digestión metanogénica es muy lenta. Dichos datos fueron analizados con un nivel de confianza del 95%.

Tabla 39

Análisis de comparación de medias del parámetro Temperatura

Variable/ Temperatura	Media	N	Desviación tip.	Error de media
Antes	30.45	3	2.95	1.70
Después	29.35	3	0.45	0.25

Figura 64. Intervalo de confianza de la Temperatura



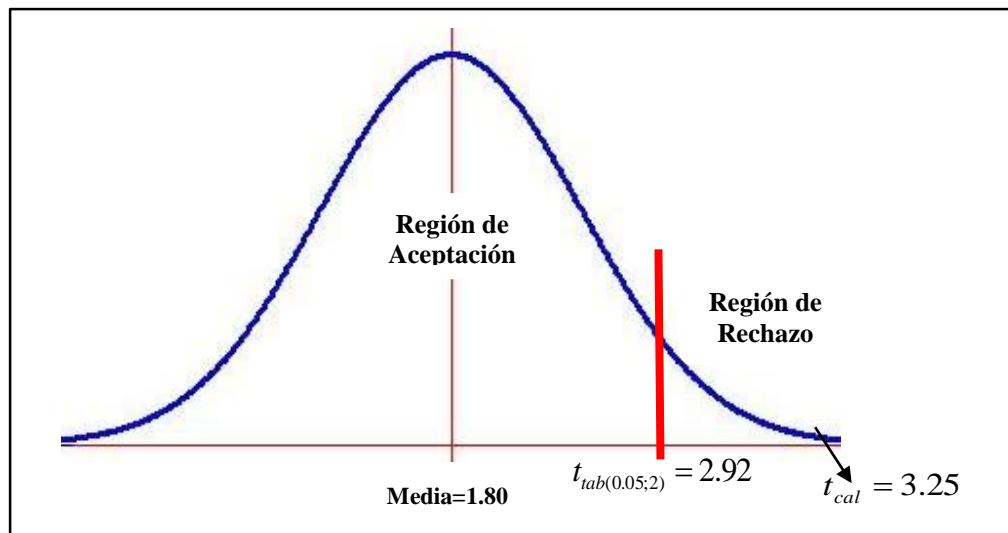
La prueba estadística de estudio, demuestra que existe suficiente evidencia para señalar que el promedio entre los resultados de la temperatura antes de ingresar al sistema de tratamiento mediante humedales artificiales se distingue notablemente con el promedio alcanzado después de ingresar al sistema de tratamiento en un 1.1 °C; además, el valor de prueba ($p < 0.05$) indica que las diferencias de los promedios son significativas, debido a que sig que vendría ser el Pcalculado es menor (0.000) a 0.05, resultado que permite rechazar la hipótesis nula, demostrando que la temperatura varía durante el proceso de tratamiento mediante humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (ver tabla 40).

Tabla 40

Prueba de T-student de muestras relacionadas del parámetro Temperatura

Variable/ Temperatura	Diferencias relacionadas				T	gl.	Sig.
	Media	Desviación Estándar	Error de la media	95% confianza Inferior Superior			
Antes- después	1.1	2.50	1.44	-4.41 8.02	3.25	2	0.000

Figura 65. Campana de Gauss del análisis de la prueba t para muestras relacionadas del parámetro Temperatura



Regla de decisión

Como el valor $t\text{-cal} = 3.25 < t\text{-tab} = 2.92$ y además el valor de Pcalculado (sig) es 0.000 siendo menor que el $\alpha = 0,05$, entonces se decide rechazar la hipótesis nula a favor de la alternativa.

Conclusión

El parámetro físico Temperatura antes fue removido con éxito en el sistema de tratamiento de humedales artificiales, obteniendo un agua residual con dicho parámetro apta para el regadío de pastizales.

4.6.11 Coliformes Totales

Como ya se determinó que los datos de los Coliformes totales tienen una distribución normal, en primer lugar, se realizó la hipótesis de la diferencia de medias.

Hipótesis de diferencia de medias

H₀: No existe diferencia significativa entre los Coliformes totales antes con los Coliformes totales después.

H_a: Existe diferencia significativa entre los Coliformes totales antes con los Coliformes totales después.

Las hipótesis resumidas estadísticamente para comprobar las diferencias de promedios del grupo en los momentos (antes y después) es:

$$\mathbf{H_0: \mu^1 = \mu^2}$$

$$\mathbf{H_a: \mu^1 \neq \mu^2}$$

O también se puede expresar así:

H₀: Coliformes Totales antes = Coliformes Totales después

H_a: Coliformes Totales antes \neq Coliformes Totales después

Estadística de prueba:

A la luz de las suposiciones, la estadística de prueba aprobada mediante la ecuación 1.

$$t = \frac{\bar{X}_d}{S_d / \sqrt{n}} \quad \Rightarrow \quad \bar{X}_d = \frac{\sum_1^n x_{i1} - x_{i2}}{n}$$

$$s_d = \sqrt{\frac{\sum_1^n (d_i - \bar{X}_d)^2}{n-1}} \quad (1)$$

Donde

\bar{X}_d = Media aritmética de las diferencias

S_d = Desviación estándar de las diferencias

n = Número de sujetos de la muestra

Distribución de la estadística de prueba:

La estadística de prueba está distribuida con la t de Student, considerando n-1 grados de libertad y 1- α de probabilidad.

Las condiciones respecto a la Ho, se detalla a continuación: se rechaza la Ho si el Pcalculado (sig) es menor que el P-valor (0.05), indicando que existe una diferencia significativa entre un antes y un después; pero si se acepta la hipótesis nula, indica que no existe diferencia significativa entre un antes y un después.

Rechazar la Ho, sig < α (0.05)

Aceptar la Ho, sig > α (0.05)

Estadística utilizando STATISTICA

Los resultados de la tabla 41, muestra de los Coliformes totales antes de pasar por el sistema de tratamiento se obtuvo un puntaje promedio de 8.0500E+10 NMP/100ml y una variabilidad de 1500000000. Sin embargo, después que el agua residual realizo el proceso de tratamiento en el sistema, presentó resultados favorables con un promedio de 4000 NMP/100ml

y una variabilidad de 2980000000, demostrando una reducción significativa debido a que el ARD pasó por un tratamiento primario (biodigestor) y un tratamiento secundario (HA). Siendo así que el sistema de tratamiento mediante humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal tuvo una eficiencia de remoción del 100%, demostrado su efectividad en el tratamiento de dichas aguas y encontrándose dentro del rango establecido (1000 NMP/100ml) por la modificatoria el Decreto supremo N° 015-2015-MINAM, siendo apta para ser aplicada en el regadío de vegetales de tallo alto, que en esta investigación son los pastizales.

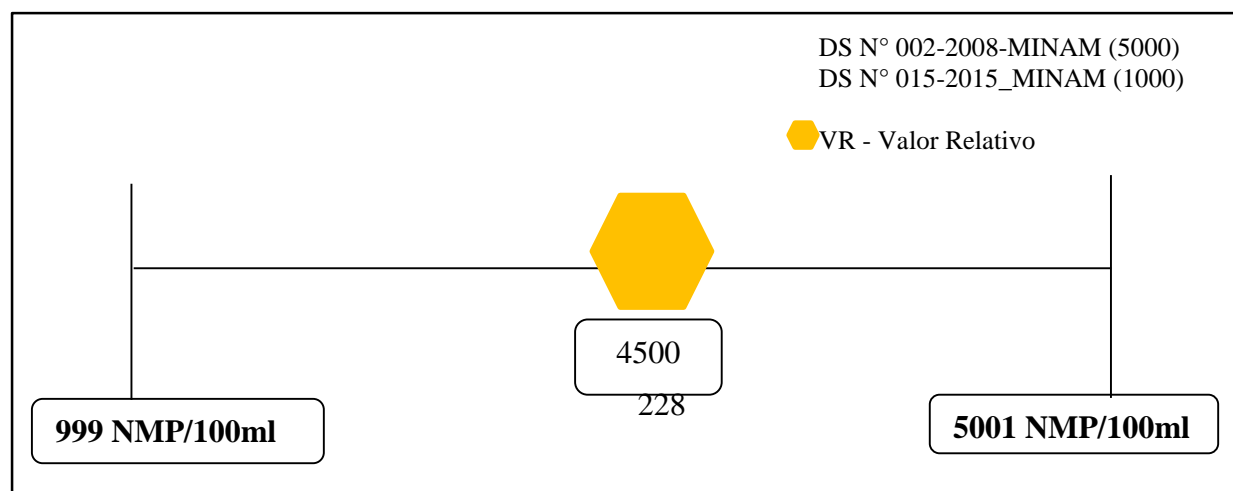
Asimismo, la media referencial y la media muestral de los Coliformes totales están contenidas en el intervalo de confianza para medias (ver figura 66). Dichos datos fueron analizados con un nivel de confianza del 95%.

Tabla 41

Análisis de comparación de medias del parámetro Coliformes totales

Variable/ Coliformes	Media	N	Desviación típica	Error de media
Totales				
Antes	850000000000	3	1500000000	866025403.8
Después	4500	3	2980000000	172050.3802

Figura 66. Intervalo de confianza de los Coliformes Totales



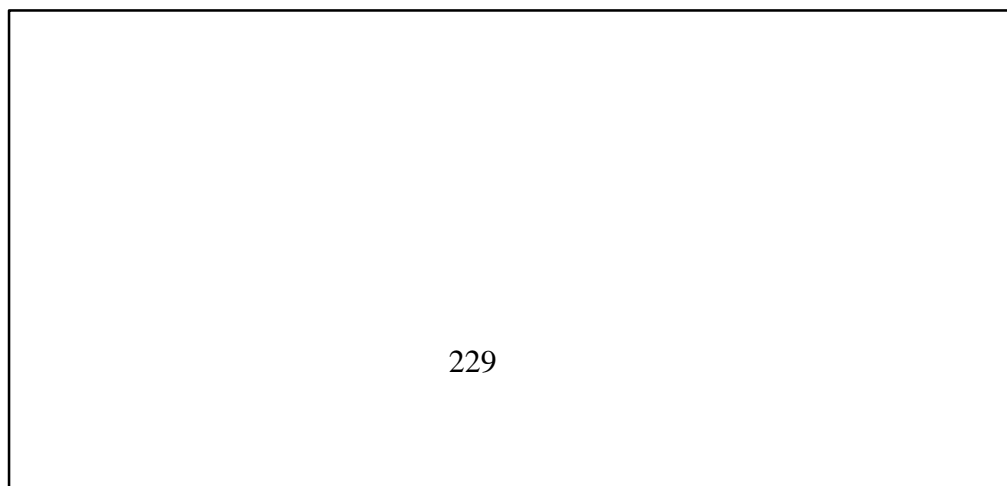
La prueba estadística de estudio, demuestra que existe suficiente evidencia para señalar que el promedio entre los resultados de los Coliformes totales antes de ingresar al sistema de tratamiento mediante humedales artificiales se distingue notablemente con el promedio alcanzado después de ingresar al sistema de tratamiento en un 849999996500 NMP/100ml; además, el valor de prueba ($p < 0.05$) indica que las diferencias de los promedios son significativas, debido a que sig que vendría ser el Pcalculado es menor (0.000) a 0.05, resultado que permite rechazar la hipótesis nula, demostrando que los Coliformes totales fue removido por el sistema de tratamiento mediante humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (ver tabla 42).

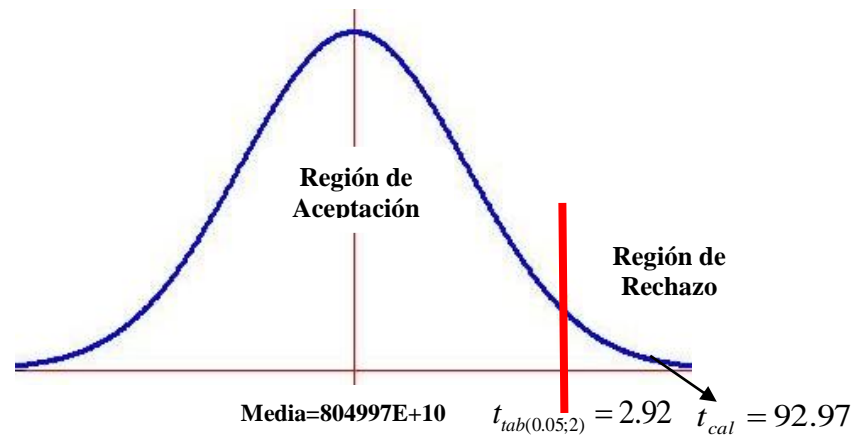
Tabla 42

Prueba de T-student de muestras relacionadas del parámetro Coliformes totales

Variable/ Coliformes Totales	Diferencias relacionadas					t	gl.	Sig.
	Media	Desviación Estándar	Error de la media	95% confianza				
				Inferior	Superior			
Antes- después	8499999 96500	1499702000	8658533 53.4	7.67742000 00000	8.4225200000 000	92.97	2	0.000

Figura 67. Campana de Gauss del análisis de la prueba t para muestras relacionadas del parámetro Coliformes totales





Regla de decisión

Como el valor $t_{cal} = 92.97 < t_{tab} = 2.92$ y además el valor de $P_{calculado}$ (sig) es 0.000 siendo menor que el $\alpha = 0,05$, entonces se decide rechazar la hipótesis nula a favor de la alternativa.

Conclusión

El parámetro microbiológico Coliformes totales antes fue removido con éxito en el sistema de tratamiento de humedales artificiales, obteniendo un agua residual con dicho parámetro apta para el riego de pastizales.

4.6.12 Coliformes Termotolerantes o Fecales

Como ya se determinó que los datos de los Coliformes termotolerantes o fecales tienen una distribución normal, en primer lugar, se realizó la hipótesis de la diferencia de medias.

Hipótesis de diferencia de medias

H₀: No existe diferencia significativa entre los Coliformes Termotolerantes o Fecales antes con los Coliformes Termotolerantes o Fecales después.

Ha: Existe diferencia significativa entre los Coliformes Termotolerantes o Fecales antes con los Coliformes Termotolerantes o Fecales después.

Las hipótesis resumidas estadísticamente para comprobar las diferencias de promedios del grupo en los momentos (antes y después) es:

$$\mathbf{H_0: } \mu^1 = \mu^2$$

$$\mathbf{H_a: } \mu^1 \neq \mu^2$$

O también se puede expresar así:

H₀: Coliformes Termotolerantes o Fecales antes = Coliformes Fecales después

H_a: Coliformes Termotolerantes o Fecales antes \neq Coliformes Fecales después

Estadística de prueba:

A la luz de las suposiciones, la estadística de prueba aprobada mediante la ecuación 1.

$$t = \frac{\bar{X}_d}{S_d / \sqrt{n}} \quad \Rightarrow \quad \bar{X}_d = \sum_1^n \frac{x_{i1} - x_{i2}}{n}$$

$$S_d = \sqrt{\frac{\sum_1^n (d_i - \bar{X}_d)^2}{n-1}} \quad (1)$$

Donde

\bar{X}_d = Media aritmética de las diferencias

S_d = Desviación estándar de las diferencias

n = Número de sujetos de la muestra

Distribución de la estadística de prueba:

La estadística de prueba está distribuida con la t de Student, considerando n-1 grados de libertad y 1- α de probabilidad.

Las condiciones respecto a la H_0 , se detalla a continuación: se rechaza la H_0 si el P calculado (sig) es menor que el P -valor (0.05), indicando que existe una diferencia significativa entre un antes y un después; pero si se acepta la hipótesis nula, indica que no existe diferencia significativa entre un antes y un después.

Rechazar la H_0 , $\text{sig} < \alpha$ (0.05)

Aceptar la H_0 , $\text{sig} > \alpha$ (0.05)

Estadística utilizando STATISTICA

Los resultados de la tabla 43, muestra de los Coliformes termotolerantes o fecales antes de pasar por el sistema de tratamiento se obtuvo un puntaje promedio de 7950000000000 NMP/100ml y una variabilidad de 500000000. Sin embargo, después que el agua residual realizo el proceso de tratamiento en el sistema, presentó resultados favorables con un promedio de 1085 NMP/100ml y una variabilidad de 199500, demostrando una reducción significativa debido a que el ARD pasó por un tratamiento primario (biodigestor) y un tratamiento secundario (HA). Siendo así que el sistema de tratamiento mediante humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal tuvo una eficiencia de remoción del 100%, demostrado su efectividad en el tratamiento de dicha agua, pero no se encuentra dentro del rango establecido (1000 NMP/100ml) por la modificatoria el Decreto supremo N° 015-2015-MINAM, siendo apta para ser aplicada en el regadío de vegetales de tallo alto, que en esta investigación son los pastizales.

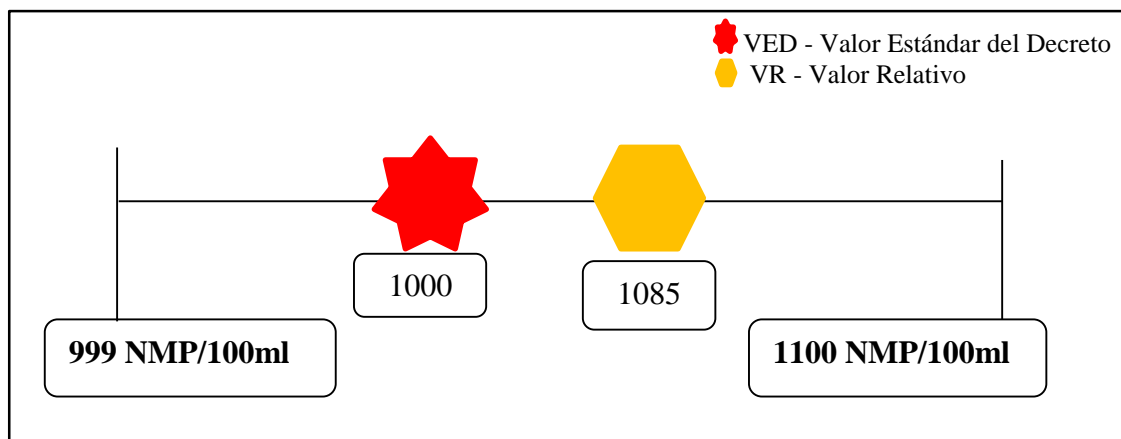
Asimismo, la media referencial y la media muestral de los Coliformes termotolerantes o fecales están contenidas en el intervalo de confianza para medias (ver figura 68). Dichos datos fueron analizados con un nivel de confianza del 95%.

Tabla 43

Análisis de comparación de medias del parámetro Coliformes termotolerantes o fecales

Variable/ Coliformes Termotolerantes o Fecales	Media	N	Desviación tip.	Error de media
Antes	7950000000000	3	500000000	288675134.6
Después	1085	3	199500	115181.38

Figura 68. Intervalo de confianza de los Coliformes Termotolerantes o Fecales



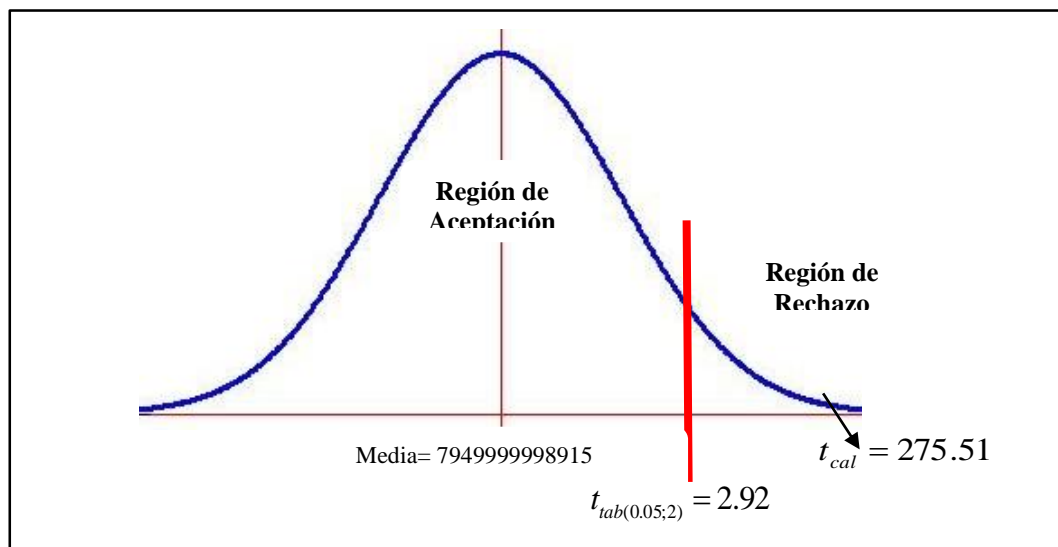
La prueba estadística de estudio, demuestra que existe suficiente evidencia para señalar que el promedio entre los resultados de los Coliformes termotolerantes o fecales antes de ingresar al sistema de tratamiento mediante humedales artificiales se distingue notablemente con el promedio alcanzado después de ingresar al sistema de tratamiento en un 7949999998915 NMP/100ml; además, el valor de prueba ($p < 0.05$) indica que las diferencias de los promedios son significativas, debido a que sig que vendría ser el Pcalculado es menor (0.000) a 0.05, resultado que permite rechazar la hipótesis nula, demostrando que los Coliformes termotolerantes o fecales fue removido por el sistema de tratamiento mediante humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (ver tabla 44).

Tabla 44

Prueba de T-student de muestras relacionadas del parámetro Coliformes fecales

Variable/ Coliformes Fecales	Diferencias relacionadas				t	gl.	Sig.	
	Media	Desviación Estándar	Error de la media	95% confianza Inferior Superior				
Antes-después	79499999 98915	499800500	2885599 53.2	7.825820 0000000 00	8.074140 0000000	275.51	2	0.000

Figura 69. Campana de Gauss del análisis de la prueba t para muestras relacionadas del parámetro Coliformes termotolerantes o fecales



Regla de decisión

Como el valor $t_{cal} = 275.51 < t_{tab} = 2.92$ y además el valor de P calculado (sig) es 0.000 siendo menor que el $\alpha = 0,05$, entonces se decide rechazar la hipótesis nula a favor de la alternativa.

Conclusión

El parámetro microbiológico Coliformes fecales antes fue removido con éxito en el sistema de tratamiento de humedales artificiales, obteniendo un agua residual con dicho parámetro apta para el regadío de pastizales.

CAPITULO V:

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- El Humedal artificial de Flujo Subsuperficial Horizontal (HAFSH) demostró una efectiva remoción en todos los parámetros analizados, alcanzando eficiencias de 96% de demanda biológica de oxígeno (DBO) y de demanda química de oxígeno (DQO); 78% de nitrógeno total; 88% de fósforo total; 96% de turbidez; 61% de oxígeno disuelto; 55% de conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales; 100% de Coliformes totales y fecales; asimismo, se obtuvo un pH neutro de 6.5, con una temperatura de 28.2 °C y un olor aceptable; obteniéndose un agua residual doméstica apta para ser utilizada en el regadío. Asimismo, los HAFSH son sistemas de fácil operación y mantenimiento; se consume energía renovable (energía solar), no requiere de personal altamente capacitado, por lo tanto, los costos son bajos; y aplicables a comunidades donde los recursos económicos son bajos.
- Se diseñó el sistema de tratamiento con los datos más relevantes de la vivienda; el caudal fue 0.03 m³/día y el parámetro DBO₅ inicial (285.10 gr/m³), dichos datos permitieron realizar la implementación del humedal con un largo de 1.20 m, un ancho de 0.60 m y una altura de 0.60 m; también, se consideró una pendiente del 1%. Dicho sistema trabajo con la especie macrófita emergente *Cyperus Papyrus* (Papiro) debido a su alta eficiencia en la remoción de nutrientes (nitrógeno y fósforo), con un tiempo de retención de 7 días. Las medidas del humedal fueron las apropiadas para mejorar la calidad del agua residual de la vivienda familiar conformada por 5 habitantes. Es por

ello que el comportamiento del humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal muestra gran eficiencia en el tratamiento secundario de las aguas residuales domésticas, debido a la gran combinación compuesta por vegetación, suelo y microorganismos.

- El *Cyperus papyrus* (Papiro) como vegetación de los humedales artificiales subsuperficiales, es una especie que se adaptó fácilmente, debido que el sistema se implementó en la temporada de verano y dicha especie es adaptable a climas con temperaturas altas; en la comunidad Cruz Verde la temperatura ambiente fue de 25.7°C, es por ello su rápida adaptación en el lugar de investigación. El papiro está adaptado a crecer bajo condiciones de suelos saturados por agua, porque tienen desarrollado un sistema de grandes espacios aéreos internos. Estos sistemas internos les permiten la provisión de aire bajo condiciones de suelo saturado con agua desde la atmósfera hacia las raíces y rizomas. Asimismo, estabilizan la superficie de los humedales construidos y la prevención de taponamientos de la matriz. Además, proveen buenas condiciones para la filtración física y una superficie grande para el crecimiento microbiano adjunto. Otra de sus propiedades es la transferencia de oxígeno a la rizósfera. Otro hecho importante, especialmente en climas templados, es la capacidad de aislamiento térmico de las macrófita; en invierno, la capa de tejido muerto que cubre la superficie protege del frío y por lo tanto de las disminuciones de temperatura del agua residual, dicha temperatura no debe ser menor a los 12 °C.
- Tanto los parámetros fisicoquímicos como microbiológicos se encuentran por debajo de los valores establecidos por los Decretos Supremos N° 002-2008-MINAM y la modificatoria N° 015-2015-MINAM. La DBO₅ final fue 12.38 mg/l, y en ambos decretos su valor máximo es 15 mg/l; la DQO fue de 30.45 mg/l, y en los decretos su

valor máximo es 40 mg/l; el Nitrógeno Total fue 6.27 mg/l y los decretos mencionan un valor de 10mg/l; el Fósforo Total fue 0.49 mg/l y en los decretos su valor es 1 mg/l; la CE fue de 370 us/cm y en los decretos su valor es 2500 us/cm; el pH fue 6.5 encontrándose dentro de los rangos (6.5 – 8.5); el OD fue de 4 mg manteniéndose dentro del rango (4 – 4.5); la temperatura fue de 28.2 °C y en el DS N° 002-2008-MINAM no existe un valor, pero en la modificatoria menciona que puede variar a +-3, y según estudios la temperatura debe mantenerse dentro del rango establecido de 10 °C a 33 °C; la turbidez y los SDT no se encuentran establecidos en los decretos, pero según estudios demuestran que la turbidez se debe mantener en el rango de 18 a 25 UNT y en nuestro caso fue de 19.3 UNT; y los SDT su rango es de 150 mg/l a 200 mg/l encontrándose también dentro del rango (180 mg/l). Para los Coliformes totales son 5000 NMP/100ml en el DS N° 002-2008-MINAM, en cambio en el la modificatoria el Decreto Supremo N° 015-2015-MINAM su valor máximo es de 1000 NMP/100 ml, y lo obtenido en la investigación fue de 1000 NMP/100 ml encontrándose dentro de ambos decretos; para los Coliformes fecales su valor en ambos decretos es 1000 NMP/100ml, y el resultado obtenido es exactamente lo mismo (1000 NMP/100ml). Concluyendo así, que dicha agua es apta para ser utilizada en el riego de vegetales de tallo alto que en dicha investigación son los pastizales. Asimismo, el efluente se encontraba en mejores cualidades organolépticas; ya que no tenían ningún olor desagradable (putrefacto) y tampoco había proliferación de vectores tales como sánscudos, mosquitos, entre otros.

5.2 Recomendaciones

- Los resultados obtenidos en esta investigación mostraron la eficacia del método para la depuración de aguas residuales domésticas, con ningún gasto de energía y un mantenimiento relativamente sencillo. En el caso de que se deseara lograr una

depuración más completa de nitrógeno y fósforo se debe realizar un sistema complementado, el cual consiste en realizar un tratamiento adicional, tal es el caso de un humedal artificial de flujo vertical, y de esta manera se obtendrá resultados del 95 al 98% en remoción de los nutrientes.

- Para tener un mayor conocimiento en la remoción de la carga orgánica mediante la especie macrófita emergente (Papiro), es necesario construir un humedal sin la especie cumpliendo la función como filtros percoladores, y de esta manera determinar saber la cantidad exacta que la especie aportará al proceso de depuración de aguas residuales domésticas.
- En el proceso de operación y mantenimiento se tiene que tener en cuenta la cosecha de la especie macrófita emergente papiro cada 6 meses, debido a que dichas plantas en estado de crecimiento consumen mucho más fósforo y nitrógeno que las plantas adultas, lo cual puede alterar los procesos de nitrificación, desnitrificación y adsorción.
- Asimismo, efectuar lavados periódicos al lecho filtrante del humedal para evitar la colmatación, la formación de flujos preferenciales y la aportación de sales a los procesos.
- Para ampliar la investigación es recomendable realizar estudios en épocas de invierno para demostrar si la eficiencia de remoción del sistema es similar, mejor o no existe eficiencia de resultados en comparación con la época de verano, siendo que estas dos épocas son las más trascendentales en el clima de esta zona.

REFERENCIAS

Albuquerque, M; Arendacz, M; Gajewska, M; Pempkowiak, O; Randerson, H; Kowalik, P. (2009). Removal of Organic Matter and Nitrogen in an HorizontalSubsurface Flow Constructed Wetland under Transient Loads. *Journal of Technology*, 7(2), 1677 - 1682.

- Alejo, M., García, R., & Solís, R. (2003). Remoción de la materia orgánica mediante la utilización de humedales artificiales en la comunidad de Santa María Nativitas, del estado de México. 1-8.
- Altor, A., & Mistch, J. (2006). Methane flux from created riparian marshes: relationship to intermittent versus continuous inundation and emergent macrophytes. *Ecology Ingenieur*, 28, 224-234.
- APHA, A. W. (1985). Método normalizados para el análisis de aguas potables y residuales.
- Arango, J. (2011). Aplicación y Viabilidad de Humedales Artificiales para el Tratamiento de Aguas Residuales en Cajamarca. Obtenido de <https://es.scribd.com/doc/61812282/Proyecto-de-tesis>
- Arenas, M., & Nuncira, A. (2010). *Evaluación de Humedales Artificiales para el Tratamiento de Aguas Residuales del Sector Industrial Avícola*. (Monografía para Optar el Título de Especialista en Ingeniería Ambiental). Bucaramanga.
- Arias, C., & Brix, H. (julio de 2003). Humedales Artificiales para el Tratamiento de Aguas Residuales. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*. 13, 17-24. Obtenido de http://www.researchgate.net/publication/230563349_Humedales_artificiales_para_el_tratamiento_de_aguas_residuales
- Arce, J., & Terreros, N. (2011). *Optimización del sistema de alcantarillado y selección del sistema de tratamiento de aguas residuales más favorables para el recinto Buijo Histórico del Cantón de Samborondón*. (Tesis de Grado). Guayaquil, Ecuador.

- Arivoli, A., & Mohanraj, R. (2013). Efficacy of *Typha angustifolia* based vertical flow constructed wetland system in pollutant reduction of domestic wastewater. *International Journal of Environmental Sciences*, 3(5), 1497-1508.
- Arroyave, A., & Castaño, J. (2009). Efectos del tipo de vegetación y de las variaciones de profundidad en la eficiencia de remoción de patógenos en humedales construidos de flujo subsuperficial. Grupo de investigación aguas y aguas de Pereira, Colombia.
- Arroyave, P. (Febrero de 2004). La Lenteja de Agua (*Lemma Minor L.*): Una planta acuática Promisoria. *EIA*, 33-38. doi:1794-1237
- Asamblea Mundial de la Salud. (1973). Programa de la OMS de Salud Humana y Medio Ambiente. Obtenido de http://libdoc.who.int/GovBodies/WHA26_R58_spa.pdf
- Asto, J., Bellota, E., & Herrera, E. (2009). Tratamiento de aguas residuales mediante humedales artificiales. Obtenido de <http://es.slideshare.net/vandick2011/tratamientodeaguasresidualesmediantehumedalesartificiales>
- Asuman, E. (2003). Manual of Practice on constructed Wetlands for wastewater treatment and reuse in Mediterranean Countries. MED- REUNET.
- Ayaz, S. (2008). Post-Treatment and Reuse of Tertiary Treated Wastewater by Constructed Wetlands. *Desalination*. 226, 249-255.
- Barrett, E., Sobsey, M., House, C., & White, K. (2001). Microbial indicator removal in onsite constructed wetlands for wastewater treatment in the Southeastern US. *Water Science and Technology*, 44(11-12), 177-182.

- Benefield, L., & Randall, C. (1980). Biological process desing for wastewater treatment. 4(16).
- Bernal, F; Mosquera, D; Maury, H; Gonzáles, D; Guerra, R; Pomare, A; Silva, M. (2003). Humedales Artificiales para el Tratamiento de las aguas residuales en la Corporación Universitaria de la Costa. *Universidad del Valle, 1*, 149-155. Obtenido de http://www.proyectopandora.es/wp-content/uploads/Bibliografia/23101319_humedales_artificiales.pdf
- Brix, H. (1993). Macrophyte-mediated oxygen transfer in wetlands: transport mechanisms and rates. *Water Science and Technology, 7*(24), 391-398.
- Brix, H. (1994). Use of constructed wetlands in water pollution control: historical development, present status, and future perspectives. *Water Science and Technology, 30*(8), 209-223.
- Brix, H. (2007). Types and applications of constructed wetland systems – recent developments. 2nd International Congress Wastewater Treatment in Small Communities, Seville (Spain).
- Boon, P., & Lee, K. (1997). Methane oxidation in sediments of a floodplain wetland in south-eastern Australia. *Microbiol, 25*(1), 138-142.
- Bodelier, P., & Laanbroek, H. (13 de January de 2004). Nitrogen as a regulatory factor of methane oxidation in soils and sediments. *ELSEVIER. FEMS Microbiology Ecology, 47*, 265-277. doi:10.1016/S0168-6496(03)00304-0
- Burciaga, M. (2008). *Uso de humedales como alternativa en el tratamiento de efluentes de la industria láctea. Tesis de Maestría en Gestión Ambiental. Centro interdisciplinario de*

investigación para el desarrollo integral regional unidad de Durango. (Tesis de grado).
Instituto politécnico nacional. Durango.

Castelless, O., Puigagut, J., Segú, E., Vaello, N., Grané, F., García, D., & García, J. (2007).
Solids accumulation in six full-scale subsurface flow constructed wetlands. *Water
Research.*, 41, 1388 –1398.

Cárdenas, A. (2005). Calidad del Agua. *Ciencia y Tecnología*, 23(5), 34-45.

Celis, J., Junod, J., & Sandoval, M. (2005). Recientes aplicaiones de la depuración de aguas
residuales con plantas acuáticas. *Theoria*, 17-25.

CEPAL. (1998). Comisión Económica para América Latina y el Caribe. Recomendaciones
de las reuniones internacionales sobre el agua: de Mar de Plata a París. Argentina.
Obtenido de <http://www.cepal.org/publicaciones/xml/0/4480/lcr1865s.pdf>

Chalarca, D., Mejía, R., & Aguirre, N. (junio de 2007). Aproximación a la determinación del
impacto de los vertimientos de las aguas residuales domésticas del municipio de
Ayapel, sobre la calidad del agua de la ciénaga. *Revista Facultad de Ingeniería
Universidad de Antioquia*, 40, 41-58.

Chang, N., Xuan, Z., Daranpob, A., & Wanielista, M. (2010). A Subsurface Upflow Wetland
System for Removal of Nutrients and Pathogens in On-Site Sewage Treatment and
Disposal Systems. *Enviromental Engineering Science*, 11(2).

Chávez, J. (Abril de 2010). *Scribd*. Obtenido de
<https://es.scribd.com/doc/52224060/Contactores-Biologicos-Rotativos-CBR>

- Cooper, P. (1993). The use of reed bed systems to treat domestic sewage: The European design and operations guidelines for reed bed treatment systems. *Lewis Publishers*, 3, 203-217.
- Cooper, P. (2005). Wetland Systems for Water Pollution Control IX. *Water Science & Technology*, 51(9), 81-90.
- Córdova, R; Lino, J; Patlán, F; Ranger, L; Rodríguez, A; Vidal, O. (2007). Humedal artificial para tratamiento de aguas residuales en la Universidad Tecnológica del Norte de Guanajuato. Guanajuato gobierno del Estado.
- Collazos, J. (2008). Tratamiento de Agua Residuales Domésticas e Industriales. Colombia. Obtenido de http://sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/2013-09-07_10-54-35TRATAMIENTO_DE_AGUAS_RESIDUALES_DOMESTICAS_E_INDUSTRIALES.pdf
- Collins, M., & Kuehl, J. (2000). Organic matter accumulation and organic soils. *Lewis Publishers*, 3(18), 137-162.
- Cuenca, F. (22 de agosto de 2014). Plantas Macrófitas. Flores y Plantas.net. *Mgazine Online*. Obtenido de <http://www.floresyplantas.net/plantas-macrofitas/>
- Curt, M. (2000). Macrófitas de interés en fitodepuración. 1-16. Obtenido de http://www.ciencias-marinas.uvigo.es/bibliografia_ambiental/outros/Manual%20de%20fitodepuracion/Capitulos%207.pdf

- D.S N° 002-2008-MINAM. (2008). Aprueba los Estándares de Calidad Ambiental para el Agua . Obtenido de http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2013/09/ds_002-2008-minam.pdf
- D.S N° 015-2015-MINAM. (Sábado 19 de Diciembre de 2015). Modifican los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua y establecen disposiciones complementarias para su aplicación.
- Dangcong, P., Bernet, N., Delgenes, J., & Moletta, R. (2000). Effect of oxygen supply methods on the performance of a sequencing batch reactor for ammonium nitrification. *Water Environment Research*, 72(2), 195-200.
- Del Castillo, L. (2009). Los foros del agua. Argentina. Obtenido de http://www.aida-waterlaw.org/PDF/Foros_del_Agua_libro.pdf
- Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L., & Andrade, M. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. Bolivia. Recuperado de http://www.infoandina.org/sites/default/files/publication/files/depuracion_de_aguas_residuales_por_medio_de_humedales_artificiales.pdf
- Delgado, R. (Abril de 2011). Proyecto Piloto de Viviendas Saludables para Caficultores Orgánicos en el Palomar Chanchamayo-Junin. Recuperado de http://www.lamolina.edu.pe/proyectos/proyecto_AQUAtech/Diplomado_I/monografias/pdf/Ruth_Suica_Delgado.pdf
- Demirezen, D., & Akbulut, H. (2011). Effect of circulation on wastewater treatment by Lemna Gibba and Lemna minor (floating aquatic macrophytes). *International Journal of Phytoremediation*, 970-984.

Días, C. (25 de junio de 2015). Tratamiento de agua residual a través de humedales. Universidad Santo Tomás Seccional Tunja. *V Congreso Internacional de Ingeniería Civil*. Obtenido de <http://www.ustatunja.edu.co/cong-civil/images/Articulos/-TRATAMIENTO%20DE%20AGUA%20RESIDUAL%20A%20TRAVES%20DE%20HUMEDALES.pdf>

Días de Morales, J. (1980). Associação de caixas de areia com vertedores "Parshall". *DAE*, 2(28), 45-59.

Dittmer, U., Meyer, D., & Langergrabe, G. (2005). Simulation of a Subsurface Vertical Flow Constructed Wetland for CSO Treatment. *EIA*, 51(9), 225-232.

DIGESA. (2007). *Protocolo de Monitoreo de la Calidad Sanitaria de los recursos Hídricos Superficiales*. Ministerio de Salud. Recuperado de [http://www.digesa.sld.pe/depa/informes_tecnicos/PROTOCOLO-MONITOREO-CALIDAD-RECURSOS-HIDRICOS-SUPERFICIALES-\(CONTINENTALES\).pdf](http://www.digesa.sld.pe/depa/informes_tecnicos/PROTOCOLO-MONITOREO-CALIDAD-RECURSOS-HIDRICOS-SUPERFICIALES-(CONTINENTALES).pdf)

ECODES. (2011). Carta Europea del Agua. Ecología y Desarrollo. Recuperado de http://www.consumoresponsable.org/actua/agua/agua_cartaeuropea

ECURED. (2015). Conferencia de las Naciones Unidas y Desarrollo. Cumbre de la Tierra de Río de Janeiro. Recuperado de http://www.ecured.cu/index.php/Cumbre_de_la_Tierra_de_R%C3%ADo_de_Janeiro

Eduardo, M. (2010). Proyecto Ejecutivo de Planta de Tratamiento de Aguas Residuales para la Localidad de Xochiapa. Recuperado de <http://cdigital.uv.mx/bitstream/123456789/30564/1/FernandezMayo.pdf>

EPA. (1999). Constructed wetlands treatment of municipal wastewaters. EPA/6225/R-99/010.

Erbanová, E., Palarčík, J., Slezák, M., & Mikulášek, P. (2012). Removing of nitrates from waste water by using pond culture. Removing of nitrates from waste water by using pond culture. *ELSEVIER*, 1552-1560. Recuperado de: http://ac.els-cdn.com/S1877705812029554/1-s2.0-S1877705812029554-main.pdf?_tid=2c3c6aea-0a42-11e5-b7bc-0000aacb361&acdnat=1433371683_6dd3004e48b159ec1662199d92b10abf

Espinoza, R. (2010). *Planta de Tratamiento de Aguas Residuales en San Juan de Miraflores*. Piura. Tesis para optar el Grado de Master en Gestión y Auditorías Ambientales. Recuperado de: [http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/29571C95BEF797F705257DCC0053233E/\\$FILE/MAS_GAA_010.pdf](http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/29571C95BEF797F705257DCC0053233E/$FILE/MAS_GAA_010.pdf)

Estrada, I. (2010). Monografía sobre humedales artificiales de flujo subsuperficial (HAFSS) para remoción de metales pesados en aguas residuales. Recuperado de: <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/11059/1833/1/333918E82.pdf>

Fazlolahi, H., & Eslamian, S. (2014). Using wetland plants in nutrient removal from municipal wastewater. *Hydrology Science and Technology*, 4(1), 68-80. Recuperado de: <http://www.inderscienceonline.com/doi/pdf/10.1504/IJHST.2014.064407>

Fazlolahi, H., & Eslaminan, S. (2014). Using wetland plants in nutrient removal from municipal wastewater. 4(1).

Fenoglio, F., Genescá, J., & Durán, C. (2001). Construcción y evaluación de electrodos de medición de potenciales de óxido-reducción para la evaluación indirecta de las

- condiciones de aerobiosis en sistemas que simulan humedales artificiales. *Ciencia Ed. (IMIQ)*, 2(16), 61-68.
- Fenoglio, L., Genescá, J., & Durán, C. (2002). Reduction-Oxidation potentials evaluation as an indirect measurement for dissolved oxygen in artificial wetlands lab models. *Ciencia Ed. (IMIQ)*, 1(8), 606-614.
- Fernández, J. (2005). Humedales artificiales para depuración. Manual de fitorremediación. Recuperado de http://www.ciencias-marinas.uvigo.es/bibliografia_ambiental/outros/Manual%20de%20fitodepuracion/Capitulos%206.pdf
- Fernández, J., & Garcés, P. (2003). El agua es un recurso indispensable. Departamento de campañas y Educación para el Desarrollo. Ayuda en Acción. Recuperado de <http://www.ayudaenaccion.org/contenidos/documentos/El%20agua%20un%20recurso%20indispensable.pdf>
- Frers, C. (2008). El uso de plantas acuáticas para el tratamiento de aguas residuales. *Observatorio Medioambiental*, 11, 301-305.
- Forero, I. (2009). Estudio del comportamiento de Humedales Artificiales de flujo Subsuperficial en la Planta experimental de Carrión de los Cespedes, Sevilla, España.
- Fuente, M., Matute, M., & Méndez, M. (2010). Diseño de un sistema de depuración de aguas residuales en el Municipio de San Jorge. Recuperado de http://api.eoi.es/api_v1_dev.php/fedora/asset/eoi:48425/componente48423.pdf

García, J., & Corzo, A. (2008). *Depuración con Humedales Construidos. Guía Práctica de Diseño, Construcción y Explotación de Sistemas de Humedales de Flujo Subsuperficial.*

García, Z. (2012). Comparación y evaluación de tres planats acuáticas para determinar la eficiencia de remoción de nutrientes en el tratamiento de aguas residuales domésticas. Obtenido de Comparación y evaluación de tres planats acuáticas para determinar la eficiencia de remoción de nutrientes en el tratamiento de aguas residuales domésticas: Recuperado de: http://ac.els-cdn.com/S0925857413004230/1-s2.0-S0925857413004230-main.pdf?_tid=340ca71e-d2f5-11e4-9d54-

García, J. (2010). *Efecto del uso de plantas y configuración de los sistemas en la remoción de organismos patógenos mediante el uso de Humedales Construidos para el Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas en Condiciones Tropicales. Pereira, Colombia.* (Tesis de Maestría). España.

Gersberg, B., Elkins, C., & Goldman, R. (Abril de 1985). Wastewater Treatment by Artificial Wetlands. *Water Science & Technology*, 17(4-5), 443-450.

González, J., Bécares, E., & Luis, E. (2001). Limnología de sistemas experimentales de lagunaje para el tratamiento de aguas residuales. Área de Ecología, Facultad de Biología. *Universidad de León*, 25(2), 267-277. Recuperado de http://www.limnetica.com/Limnetica/Limne20/L20b267_Limnologia_lagunaje_tratamiento_aguas_residuales.pdf

- González, J. (2007). *El acceso al Agua Potable como Derecho Humano (Vol. 1)*. Club Universitario. Recuperado de: <https://books.google.com.pe/books?id=8-PiBwAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false>
- Guido, A., & Durán, C. (enero-junio de 2008). Remoción de contaminantes en un sistema modelo de humedales artificiales a escala de laboratorio. *Tecnología, Ciencia, Educación*, 23(1), 15-22.
- Haber, R; Grego, S; Langergraber, G; Kadlec, R; Cicalini, A; Martins, S; Novias, J; Aubert, S; Gerth, A; Thomas, H; Hebner, A. (2003). Constructed Wetlands for the Treatment of Organic Pollutants. *Soils y Sediments*, 3(2), 109-124.
- Hadad, H; Mufarrege, M; Pinciroli, M; Di Luca, G; Del Sastre, V; Maine, M. (2008). Macrophyte morphological response to the industrial effluent toxicity in a constructed wetland. In: *Wetlands: Ecology, Conservation and Restoration*. New York: Nova Science Publishers.
- Hagendorf, U., Diehl, I., Feuerpfeil, A., Hummel, K., & Szewzyk, R. (2000). Retention of microbial organisms in constructed wetlands. *International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control*. Florida, USA: IWA.
- Hammel, B., Grayum, M., Herrera, C., & Zamora, N. (2003). *Manual de plantas de Costa Rica*. Missouri Botanical Garden.
- Hauenstein, E., González, M., Peña, F., & Muñoz, A. (2002). Classification and Characterization of the Flora and Vegetation. *SciELO*, 59, 58 - 100.

Heike, H., Plastzer, C., Winker, M., & Muench, E. (2011). *Technology Review Constructed Wetlands*. Recuperado de

http://www.sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/HOFFMANN%20et%20al%20%202011%20Technology%20Review%20of%20Constructed%20Wetlands.p

Heike, H; Winker, M. (2011). *Technology Review of Constructed Wetlands Subsurface flow constructed wetlands for greywater and domestic wastewater treatment*. Recuperado de

http://www.sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/Revisi%C3%B3n%20T%C3%A9cnica%20de%20Humedales%20Artificiales.pdf

Hench, K., Bissonnette, G., Sexstone, A., Coleman, J., Garbutt, K., & Skousen, J. (2003). Fate of physical, chemical, and microbial contaminants in domestic wastewater following treatment by small constructed wetlands. *Water Research*, 37(4), 921-927.

Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, L. (2010). *Métodos de la investigación (5ta ed.)*. México DF: MacGraw-Hill.

Hernández, M. (abril - junio de 2010). Suelos de Humedales como sumideros de carbono y fuentes de metano. *Redalyc*, 28(2), 139-147. doi:0187-5779

Hidalgo, R., Montano, J., & Sandoval, M. (2005). Recientes aplicaciones de la depuración de aguas residuales con plantas acuáticas. *14* (1), 17-25.

Hoffman, M. (2013). *Nutrient Removal in Natural Swimming Pools a mass balance analysis*.

- Hoffmann, H., Plastzer, C., Winker, M., & Muench, E. (2011). Revisión técnica de humedales artificiales de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas de riego y aguas domésticas. Recuperado de http://www.sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/Revisi%C3%B3n%20T%C3%A9cnica%20de%20Humedales%20Artificiales.pdf
- Hua, C., Kamil, M., Shutes, B., Chye, S., & Mansor, M. (10 de March de 2007). Nutrient removal in a pilot and full scale constructed wetland, Putrajaya city, Malaysia. *ELSEIVER*, 307-317.
- Indian Health Service. (2009). Indian Health Service Sanitation Facilities Construction Program Wastewater Lagoon Operation & Maintenance. Recuperado de: http://www.epa.gov/region6/6dra/oejta/tribalaffairs/pdfs/bie_2010/wastewater_glime.pdf
- Isoaari, P., Hermanowicz, S., & Rubin, Y. (7 de July de 2010). Sustainable Natural Systems for Treatment and Disposal of Food Processing Wastewater. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 662-697. Recuperado de http://www.ce.berkeley.edu/sites/default/files/assets/users/rubin/Isoaari_ea_2010a.pdf
- IWA. (2000). Constructed wetlands for pollution control: Processes, performance, design, and operation. *Scientific and Technical Report*. 2(8).
- Jaramillo, M., & Flores, E. (2012). Fitorremediación mediante el uso de dos especies vegetales Lemna Minor (Lenteja de agua), y Eichornia crassipes (Jacinto de agua) en aguas residuales producto de la actividad minera.

- Jones, R., & Morita, Y. (1983). Methane oxidation by *Nitrosococcus oceanus* and *Nitrosomonas europaea*. *Environmental Microbiol*, 45(2), 401-410.
- Juárez, A., Villatoro, R., & López, G. (2011). T de student para muestras relacionadas. Recuperado de http://www.rincondepaco.com.mx/rincon/Inicio/Apuntes/Proyecto/archivos/Documentos/t_relacionadas.pdf
- Kadlec, R. (1997). An autotrophic wetland phosphorus model. *Ecological Engineering*, 8, 145-172.
- Kadlec, R., & Wallace, S. (2009). *Treatment Wetland*. Second Edition. London, New York: CRC Press. Recuperado de http://www.sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/KADLEC%20WALLACE%202009%20Treatment%20Wetlands%202nd%20Edition_0.pdf
- Kadlec, R. (2003). The limits of phosphorus removal wetlands. *Wetlands ecology*, 7(24), 165-175.
- Karathanasis, A., Potter, C., & Coyne, M. (Mayo de 2003). Vegetation effects on fecal bacteria, BOD, and suspended solid removal in constructed wetlands treating domestic wastewater. *Ecological Engineering*, 20(2), 157-159.
- Kemp, M., & George, D. (1997). Subsurface flow constructed wetlands treating municipal wastewater for nitrogen transformation and removal. *Water EnvironWater Environ*, 69(7), 1254-1262.

- Kickuth, R. (1983). A low cost process for purification of municipal and industrial waste water. 141-154.
- Kim, S., & Geary, P. (2001). The impact of biomass harvesting on phosphorus uptake by wetland plants. *Water Science and Technology*, 44(11-12), 61-67.
- Knight, R., Ruble, R., Kadlec, R., & Reed, S. (Septiembre de 1993). Database North American wetlands for water quality treatment, Phase II Report, prepared for USEPA. *Ecological Engineering*, 25(5).
- Kolb, P. (1998). *Design of a constructed Wetland (pilot plant) for the reclamation of the river Besós*. (Master's Thesis). University of Agricultural Sciences. Francia.
- Kowalik, P., Obarska, H., & Poland, S. (1998). Constructed wetlands for wastewater treatment in Europe. *Water Science and Technology*, 88(2), 217-225.
- Kurup, R. (2007). *An experimental researcho on application of subsurface flow constructed wetlands for meat processing Industry Effluent Treatmente and Nutrient Removal*. (Tesis para Optar el Título de Magíster).
- Kyambadde, H., Kansiime, F., & Dalhammar, G. (2005). *Nitrogen and phosphorus removal in substrate-free pilot constructed wetlands with horizontal surface flow in Uganda*.
 Recuperado de: <http://www.environmental-expert.com/Files%5C6063%5Carticles%5C5197%5CK2VV143L0425056G.pdf>
- Lara, J. (1999). *Depuración de Aguas Residuales Municipales con Humedales Artificiales*. (Tesis para optar el grado de máster). Universidad Técnica de Cataluña y el instituto Catalán de tecnología. España, Barcelona.

- León, M., & Lucero, A. (2009). Estudio de *Eichhornia crassipes*, *Lemna gibba* y *Azolla filiculoides* en el tratamiento biológico de aguas residuales domésticas en sistemas comunitarios y unifamiliares del Cantón Cotacachi. Ecuador.
- Laing, C., Shreeve, G., & Pearce, E. (2008). Methane bubbles in surface peat cores: in situ measurements. *Global Change Biol*, 14(4), 916-924.
- Limón, J. (2013). *Los Lodos de la Plantas de Tratamiento de Agua Residuales, ¿Problema o Recurso?* Guadalajara, Jalisco. Recuperado de http://www.ai.org.mx/ai/images/sitio/201309/ingresos/jglm/doc_ingreso_gualberto_limón_trabajo_de_ingreso.pdf
- Llagas, W., & Guadalupe, E. (2006). Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNMSM. *Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG*, 15(17), 85-96. Recuperado de <http://cecodes.net/files/articulo%20humedales%201.pdf>
- Lohora, A. (2001). Depuración de aguas residuales mediante humedales artificiales.
- Ly, J. (2007). Macrófitas acuáticas flotantes en sistemas integrados de producción animal. 89-111. Recuperado de http://www.avpa.ula.ve/eventos/viii_encuentro_monogastricos/curso_alimentacion_no_convencional/conferencia-8.pdf
- Luna, V., & Aburto, S. (June de 2014). Sistema de humedales artificiales para el control de la eutroficación del lago del Bosque de San Juan de Aragón. *Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 17(1), 32-55. doi:10.1016/S1405-888X(14)70318-3

- Manual técnico de difusión. (2008). Sistemas de Tratamiento de aguas residuales para Albergues en zonas Rurales. Gestión Ambiental. Recuperado de <http://www.perueduca.edu.pe/educacion-para-el-trabajo/archivos/aguas-servidas-ctp.pdf>
- Mantovi, P; Marmiroli, M; Maestri, E; Tagliavini, F; Piccinini, S; Marmiroli, N. (2003). Application of a horizontal subsurface flow constructed wetland on treatment of dairy parlor wastewater. *Bioresource Technology*, 88(2), 85-94.
- Marsilli, A. (2005). Tratamiento de aguas residuales. Recuperado de <http://www.tierramor.org/Articulos/tratagua.htm#biodig>
- Martínez, Z. (2010). Diseño de un modelo de biodigestor para el uso de familias rurales en el Perú. Facultad de agronomía. Universidad Nacional Agraria La Molina. Perú. pp. 11-29.
- Martínez, G., & Marí, B. (2003). La distribución Normal. Universidad Politecnica de Valencia.
- Mendez, F., & Muñoz, O. (2010). Propuesta de un modelo sosio económico de desición de uso de aguas residuales tratadas en sustitucion de agua limpia para áreas verdes. Perú.
- Mendenhall, W., & Reinmuth, J. (1978). Estadística para administración y economía. (Ed.). *Grupo Editorial Iberoamericana*. ISN 968-7270-13-6.
- Metcalf, R., & Eddy, I. (1991). *Wastewater engineering: Treatment and reuse* (3rd edición ed.). New Delhi: Tata McGraw-Hill.

Minchola, J., & Gonzáles, F. (Julio-Diciembre de 2013). Constructed wetlands for treating domestic wastewater in the Barrick mine. *Arnaldoa*, 2(20), 433-444.

MINAM. (2002). Humedales. Ministerio del Ambiente. Recuperado de <http://www.minam.gob.pe/diversidadbiologica/humedales/>

MINAM, D.S. N° 002- 2008. Aprueban los estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua. Perú. Recuperado de http://www.ana.gob.pe/media/664662/ds_002_2008_minam.pdf

MINAM. (2009). Manual para Municipios Ecoeficientes. Lima: ENOTRIA S.A. Recuperado de http://www.minam.gob.pe/calidadambiental/wp-content/uploads/sites/22/2013/10/manual_para_municipios_ecoeficientes.pdf

MINAQUA. (2013). *Report on the most suitable technologies*. Demonstration project for water in car wash premises using innovative detergents and soft treatment systems.

Ministerio de Agricultura, ANA. (2010). *Protocolo de Monitoreo de la calidad de los Recursos Hídricos, Autoridad Nacional del Agua - DGCRH*.

Ministerio de Vivienda y Construcción. (2010). Aprueban Lineamiento de Política para la promoción del tratamiento para el reuso de las aguas residuales domésticas y municipales en el riego de áreas verdes urbanas y periurbanas. Lima. Recuperado de <http://www.epsgrau.com.pe/archivos/Resoluci%C3%B3n%20Ministerial%20N%C2%BA%20176-2010-VIVIENDA,%20Lineamientos%20de%20Promoci%C3%B3n%20del%20tratamiento%20para%20el%20reuso%20aguas%20residuales.pdf>

- Mitsch, W., & Gosselink. (2000). *Wetlands* (3 ed.). USA, Nueva York.
- Mortelo, J., & Lara, J. (2012). Macrófitas flotantes en el tratamiento de aguas residuales: una revisión del estado del arte. *Ingeniería y Ciencia*, 8(15), 221-243.
- Moshiri, G. (1993). *Constructed Wetlands for Water Quality Improvement*. Lewis Publishers, 2(15).
- Muñoz, N. (2015). Diseño de un Sistema de Tratamiento de Aguas Grises por Medio de Biojardinería Aplicado a Viviendas Rurales del Departamento de Quiché. Quiché, Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala. Recuperado de <http://www.repositorio.usac.edu.gt/1058/1/Nelson%20Esa%20C3%BA%20Mu%20C3%B1oz%20Soto.pdf>
- Neue, H., Gaunt, J., Wang, P., & Becker-Heidmann, C. (1997). Carbon in tropical wetlands. *Geoderma*, 79(4), 163-185.
- Nolasco, D. (2010). Desarrollo de proyectos MDL en plantas de tratamiento de aguas residuales. Banco Interamericano de Desarrollo (BID). Recuperado de <https://publications.iadb.org/bitstream/handle/11319/5506/Desarrollo%20de%20proyectos%20MDL%20en%20plantas%20de%20tratamiento%20de%20aguas%20residuales%20.pdf?sequence=1>
- Norma OS 090. (8 de junio de 2006). Planta de Tratamiento de Aguas Residuales. Reglamento Nacional de Edificaciones. Lima, Perú: El Peruano.

- Noyola, A., Morgan, J., & Guereca, L. (2013). *Selección de Tecnologías para el Tratamiento de Aguas Residuales Municipales*. México. doi:978-607-02-4822-1. Recuperado de http://www.pronatura-sur.org/web/docs/Tecnologia_Aguas_Residuales.pdf
- Ocola, J. (2005). Protección del agua - Vigilancia y control de vertimientos - PAVER. Recuperado de <http://www.ana.gob.pe/media/353227/4-protecci%C3%B3n%20del%20agua%20vigilancia%20y%20control%20de%20vertimientos%20paver.%20%20lic.%20juan%20ocola.pdf>
- OEFA. (2014). Fiscalización Ambiental en Aguas Residuales. Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental. Recuperado de http://www.oefa.gob.pe/?wpfb_dl=7827
- Ohio, D. (26 de may de 2006). Horizontal subsurface flow constructed wetlands for on-site wastewater treatment. Recuperado de <http://www.loganhealth.org/assets/HSSFCWs.pdf>
- Ojeda, L., Romero, S., & Reyes, J. (2006). Evaluación de la depuración de agua gris en un humedal artificial a escala piloto. *Engineer Enviromental* 24(3), 1-5.
- OMS. (2013). *Organizació Mundial de la Salud. Guías de la OMS*. Uso seguro de aguas residuales y excretas. Recuperado de http://www.ais.unwater.org/ais/pluginfile.php/378/mod_page/content/148/Session3a_Medlicott_WHO_En.pdf
- OPS. (2008). *Organización Panamericana de la Salud. Representación en el Perú*. Humedales Artificiales- documentación de experiencias existentes en el Perú. Lima. Recuperado de http://bvs.per.paho.org/SCT/SCT2007-054/SCT2007054_1.pdf

- OPS, & OMS. (1979). *Organización Panamericana de Salud y Organización Mundial de la Salud*. Guía para el Desarrollo de Recursos Humanos y Saneamiento Ambiental. Brasil. Recuperado de <http://hist.library.paho.org/Spanish/DRH/15146.pdf>
- Orozco, M. (2010). Efectividad en la remoción de organismos patógenos de aguas residuales domésticas utilizando humedales artificiales con diferentes tipos de flujo. Recuperado de <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/11059/1687/1/628162074.pdf>
- Otárola, A. (2011). Evaluación del sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas mediante humedales artificiales de alta tasa en la localidad petrolera de Caño Gndul. Recuperado de <http://www.bdigital.unal.edu.co/5044/1/292544.2011.pdf>
- Padrón, L. (2005). *Depuración de aguas residuales domésticas a través de humedales artificiales de flujo vertical en zonas trópico-húmedas*. (Tesis de maestría en Ciencias Ambientales). Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.
- Peña, M., Van Ginneken, M., & Madera, C. (2003). Humedales de Flujo Subsuperficial: Una Alternativa Natural para el Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas en Zonas Tropicales. Universidad del Valle, Instituto CINARA. Calí, Colombia.
- Peralta, F., Yungan, J., Ramirez, W., & Ernesto, V. (1999). Diseño de Lagunas de Estabilización para el Tratamiento de Aguas Residuales Provenientes de las Industrias Procesadoras (Empacadoras) de Camarón. Recuperado de <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/4557/1/7078.pdf>
- Pérez, E. (2013). *Diseño y Construcción de un Pantano de Flujo Vertical a Escala Piloto*. (Tesis de pregrado). Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.

- Pérez, R., Alfaro, C., Sasa, J., & Agüero, J. (2012). Evaluación del funcionamiento de un sistema alternativo de Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. (Vol. 27). Costa Rica.
- Pérez, L. (2005). *Teoría de la Sedimentación*. Instituto de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Recuperado de http://www.fi.uba.ar/archivos/institutos_teoria_sedimentacion.pdf
- Londoño, L., & Marín, C. (2009). *Evaluación de la eficiencia de remoción de la materia orgánica en Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Horizontal Alimentados con Agua Residual Sintética*. (Requisito parcial para optar el título de tecnólogo químico). Pereira.
- Pidre, J. (2010). Influencia del tipo y granulometría del sustrato en la depuración de aguas residuales por el sistema de humedales artificiales de flujo vertical y horizontal. Universidad de Cádiz. 1-369.
- Pirjo, I., Slawomir, W., & Yoram, R. (9 de July de 2010). Sustainable Natural Systems for Treatment and Disposal of Food Processing Wastewater. *Environmental Science and Technology*, 40(3), 662-697. doi:10.1080/10643380802359396
- Plaza de los Reyes, C., Vera, L., Salvato, M., Borin, M., & Vidal, G. (Junio de 2011). Consideraciones para la eliminación del nitrógeno en humedales artificiales. *Tecnología del Agua*, 2(28), 41-49.
- Programa Pequeños Fondos Competitivos para Investigación. (21 de Agosto de 2007). *SlideShare*. Recuperado de SlideShare: <http://es.slideshare.net/janetross/humedales-artificiales-en-lacabamba>

- Queralt, R. (2003). *Tratamiento de aguas industriales: Generalidades*. Barcelona.
- Ramírez, H., Luna, M., & Arredondo, J. (2009). Evaluación de un humedal artificial de flujo vertical intermitente, para obtener agua de buena calidad para la acuicultura. *Mexicana de Ingeniería Química*, 8(1), 93-99.
- Ramos, C. (Noviembre de 2008). Aguas residuales generadas en hospitales. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, XXIX(2), 56-60.
- Reddy, K., & Patrick, W. (1984). Nitrogen transformations and loss in flooded soils and sediments. *Revista Environment*, 2(13), 273-309.
- Reinoso, R., Torres, L., & Bécares, E. (2008). Efficiency of natural systems for removal of bacteria and pathogenic parasites from wastewater. *Science of the Total Environment*, 395, 80 – 86.
- Ribeiro, O., Álvarez, M., Riobos, P., & Cirujano, S. (2004). Descomposición de helófitos en un humedal semiárido hipertrófico. *Anales del Jardín Botánico de Madrid*, 61(3), 53-61.
- Rivas, A., & Paredes, D. (2014). Sistemas de humedales para el manejo, tratamiento y mejoramiento de la calidad de agua. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México Coordinación de Tratamiento y Calidad del Agua (2), 189. Recuperado de https://www.imta.gob.mx/biblioteca/libros_html/sistemas-de-humedales/files/assets/common/downloads/publication.pdf
- Rodríguez, M., Molina, J., Jácome, A., & Suárez, J. (Abril-Junio de 2013). Humedal de flujo vertical para tratamiento terciario del efluente físico-químico de una estación

depuradora de aguas residuales domésticas. Ingeniería Investigación y Tecnología, XIV(2). Recuperado de http://www.ingenieria.unam.mx/~revistafi/ejemplaresHTML/V14N2/V14N2_art07.php

Romero, J. (2004). *Tratamiento de Aguas Residuales: Teoría y Principios de Diseño*. (Tercera edición ed.). Colombia: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería

Rousseau, D., Vanrolleghem, P., & Pauw, N. (2004). Model-Based Design of Horizontal Subsurface Flow Constructed Treatment Wetlands: A review. *Water Res*, 6(38), 1484 – 1493.

Rojas, J. (Febrero 2004). *Tratamiento de Aguas Residuales. Teoría y principios de diseño* (Tercera ed.). Escuela Colombiana de Ingeniería. ISBN 9588060133.

Rojas, R. (2002). *Conferencia: Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales*. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, División de Salud y Ambiente, Organización Panamericana de la Salud, Organización Mundial de la Salud.

Sanabria, O. (2009). Humedales Artificiales de Alta Tasa - HAAT- Reactores de flujo horizontal subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales: Teoría y práctica. *EIA*, 3(22), 54-59.

Salas, J., Pidre, J., & Cuenca, I. (2008). Manual de Tecnologías no Convencionales para la depuración de aguas residuales. CENTA. Recuperado de http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/web/Bloques_Tematicos/agencia_andaluza_agua/ciclo_integral_del_agua_urbana/depuracion/capitulo_uno_centa.pdf

Sánchez, V. (s.f.). Sistemas Alternativos de Agua y Saneamiento. Tecnología Ambiental Sustentable S.A. Recuperado de http://www.usmp.edu.pe/vision2012_lima/SEMINARIOS/conferenciasJueves/Saneamiento.pdf

Sasikala, S., Tanaka, N., Wah Wah, H., & Jinadasa, K. (2009). Effects of water level fluctuation on radial oxygen loss, root porosity, and nitrogen removal in subsurface vertical flow wetland mesocosms. *Ecology Engineer*(35), 410-417.

Savant, N., & De Datta, S. (1982). Nitrogen transformation in wetland soils. *Agronom*(35), 241-302.

Stearman, G. (2003). Pesticide removal from container nursery runoff in constructed wetland cells. *Journal of Environmental Quality*. (32), 1548-1556.

Sierra, O., & López, G. (Enero de 2013). Tratamiento de Aguas Residuales mediante Humedales Artificiales. *Revista de Dibulgación. División Académica de Ciencias Biológicas*, XIX(36).

Silva, M. (1996). *Tratamiento de Aguas residuales en Nicaragua y el reuso en la agricultura*. Mayasa, Nicaragua. Recuperado de <http://www.hakkrems.ac.at/alteseite/aktivitaeten/schuljahr0405/spanischnic/nicaragua.pdf>

Silva, H. (1989). *CEPIS, USB, SDE, OPS, OMS. Guías OMS Uso Seguro de Aguas Residuales y Excretas en la Agricultura y Acuicultura*.

Silva, J. (2008). *Humedales Construidos*. Colombia.

- Sim, C. (2003). The use of constructed wetlands for wastewater treatment. *Wetlands International*, 24. Recuperado de http://www.wetlands.org/Portals/0/publications/Book/Constructed_Wetlands-PDF.pdf
- Solís, A. (2014). *Evaluación de la capacidad remediadora de la vegetación en un humedal artificial*. México. Recuperado de <http://148.206.53.84/tesiuami/UAMI16375.pdf>
- Seoánez, M. (2005). *Depuración de las aguas residuales por tecnologías ecológicas y de bajo costo*. Primera edición. Ediciones Mundi Prensa. Madrid, España.
- Swearingen, J., & Saltonstall, K. (2010). *Phragmites Field Guide: Distinguishing Native and Exotic Forms of Common Reed (Phragmites australis) in the United States*. Recuperado de <http://www.nps.gov/plants/alien/fact/pdf/phau1-powerpoint.pdf>
- Shapiro, M., & Wilk, B. (Diciembre de 1965). An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples). *Biometrika*, 52(3-4), 591-611.
- Shu, W. (2003). *Exploring the potential utilization of vetiver in treating acid mine drainage (AMD)*. Guangzhou, República Popular China, China .
- Tanner, C. (1996). Plants for constructed wetland treatment systems - A comparison of the growth and nutrient uptake of eight emergent species. *Ecology Enginier*. (7), 59-83
- Tanner, C. (2000). Plants as ecosystem engineers in subsurface-flow treatment wetlands. Proceedings of the International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control. *Ecology Enginier*. 1(4), 13-22.

- Tilley, E. (2008). Compendium of Sanitation Systems and Technologies (pre print). *Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology (Eawag)*, 5(3), 24-30.
- Torres, E., & Marín, A. (13 de Septiembre de 2012). Optimization of Artificial Wetland Type Subsurface Wastewater Treatment. *Ingenio Libre*, 21(3), 1-10.
- Torres, A., Ramírez, V., Fernández, L., & Barriga, S. (2005). Methanogenesis and methane oxidation in wetlands. Implications in the global carbon cycle. *Hydrobiología*, 15, 327-349.
- Turetsky, M., Manning, S., & Wieder, K. (2004). Wetland. *Dating recent peat deposits*, 2(6), 324-356.
- UNESCO. (2011). *Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente*.
- UNIFEM. (2008). *Fondo de Desarrollo de las Naciones Unidas para la Mujer*. Recuperado de http://www.cimacnoticias.com.mx/documentos/cambio_climatico/conf_inter_sobre_agua_y_medio_ambiente.pdf
- Varila, J., & Díaz, F. (Julio - Diciembre de 2008). Tratamiento de aguas residuales mediante lodos activados a escala laboratorio. *Journal of Technology*, 7(2), 21-28. doi:1692-1399
- Valero, M. (2006). *Aplicación Tecnológica de las Macrófitas a la depuración de aguas residuales con la ayuda de Microorganismos*. (Monografía para Optar el Título de Especialista en Ingeniería Ambiental). Buracamanga. Recuperado de <http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/7580/2/121012.pdf>

- Vigil, D. (2008). Biodigestor: La solución en el tratamiento de aguas residuales en campamentos mineros. La llave. *Boletín Técnico*. Lima. Recuperado de <http://www.leer-mas.com/lallave/news43/info.php>
- Von Münch, E. (2009). Humedales Artificiales para el tratamiento de aguas grises y aguas residuales domésticas en países en desarrollo. *Ecosan*, 1-27. Recuperado de <http://www.rotaria.net/peru3/rotaria/files/Manual%20Humedal.pdf>
- Vymazal, J. (july de 2005). Horizontal sub-surface flow and hybrid constructed wetlands systems for wastewater treatment. *Ecological Engineering*. 25. Recuperado de http://www.researchgate.net/profile/Jan_Vymazal/publication/222816208_Horizontal_sub-surface_flow_and_hybrid_constructed_wetlands_systems_for_wastewater_treatment/links/0c9605314ff33a7046000000.pdf
- Vymazal, J. (2007). Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *Science of the Total Environment*, 380, 48–65. doi:10.1016/j.scitotenv.2006.09.014
- Vymazal, J. (2008). Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: A Review.
- Vymazal, J. (2008). Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: A Review. *Ecological Engineering*, 965-980. Recuperado de [Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: A Review](http://www.researchgate.net/publication/222411646_Constructed_Wetlands_for_Wastewater_Treatment:_A_Review/wel/Downloads/0c9605314ff33220f2000000.pdf)
- Vymazal, J. (2009). The use constructed wetlands with horizontal sub-surface flow for various types of wastewater. *Ecological Engineering*. 35, 1-17. DOI: 10.1016/2009.05.014. Recuperado de https://www.researchgate.net/profile/Jan_Vymazal/publication/222411646_The_use_of_constructed_wetlands_with_horizontal_sub-surface_flow_for_various_types_of_wastewater/links/0c9605314ff33220f2000000.pdf

_constructed_wetlands_with_horizontal_sub-
surface_flow_for_various_types_of_wastewater/links/0deec53029c54a6a51000000.
pdf

Vymazal, J. (2010). Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. *Water*, 2, 530-549.
doi:10.3390/w2030530

Vymazal, J. (2011). Plants used in constructed wetlands with horizontal subsurface flow: a
review. *Hydrobiologia*, 674, 133-156. doi:10.1007/s10750-011-0738-9

Vymazal, J., & Kropfelová, L. (2008). Wastewater Treatment in Constructed Wetlands with
Horizontal Sub-Surface Flow. Springer. Recuperado de
https://books.google.com.pe/books?id=IfqerCqRvg8C&pg=PA445&lpg=PA445&dq=Cooper+P.F.+1993.+The+use+of+reed+bed+systems+to+treat+domestic+sewage:&source=bl&ots=rvuu4nTDWd&sig=Vscm_FhO9d0x8eTVodaGiq2gRJ8&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwjvs6zyiMDJAhXC1x4KHSi2B_UQ6AEIHT

Wetzel, R. (1993). Constructed wetlands. *Constructed Wetlands for Water Quality Improvement. Scientific foundations are critical.*, 2, 3-7.

Wetzel, R. (2001). Fundamental processes within natural and constructed wetlands
ecosystems: short-term objectives. *Water Science and Technology*, 44(11-12), 1-8.

WHO. (1996). *World Health Organization. Analysis of Wastewater for Use in Agriculture, A Laboratory Manual of Parasitological and Bacteriological Techniques*. Geneva.
Recuperado de
http://www.who.int/water_sanitation_health/wastewater/labmanual.pdf?ua=1

WHO. (2006). *World Health Organization*. Who Guidelines for the, safe use of wastewater, Excreta and Greywater. 1. Policy and Regulatory aspects, 1-114.

Zarela, M., & García, T. (2012). Comparación y evaluación de tres plantas acuáticas para determinar la eficiencia de remoción de nutrientes en el tratamiento de aguas residuales domésticas. Recuperado de http://www.lima-water.de/documents/zgarcia_tesis.pdf

Zhang, Z. (2008). *Plant Growth and Nutrient removal in simulated secondary-treated municipal wastewater in wetland microcosms*.

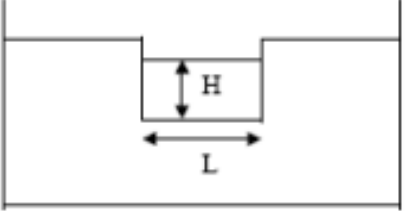
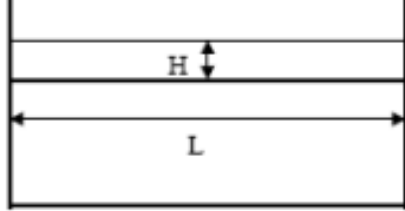
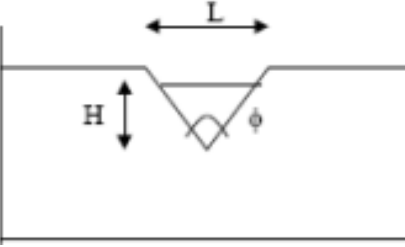
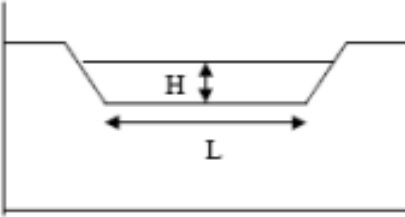
ANEXOS

Anexo 1. Método del vertedero

Tabla 45

Aforo del caudal, método del vertedero

Tipo del Vertedero	Diagrama	Ecuación
--------------------	----------	----------

Rectangular con contracción		$Q = 1.83 * L * H^{1.5}$ $Q = \text{caudal en m}^3/\text{seg}$ $L = \text{longitud de cresta en m}$ $H = \text{cabeza en m}$
Rectangular sin contracción (cuando cae por una pared)		$Q = 3.3 * L * H^{1.5}$ $Q = \text{caudal en m}^3/\text{seg}$ $L = \text{longitud de cresta en m}$ $H = \text{cabeza en m}$
Triangular		$\phi = 90^\circ$ $Q = 1.4 * H^{5/2}$ $Q = \text{caudal en m}^3/\text{seg}$ $H = \text{cabeza en m}$ $\phi = 60^\circ$ $Q = 0.775 * H^{2.47}$ $Q = \text{caudal en m}^3/\text{seg}$ $H = \text{cabeza en m}$
Trapezoidal		Si la pendiente de los lados tiene una relación $4_{(\text{vertical})} / 1_{(\text{horizontal})}$, se aplica: $Q = 1.859 * L * H^{1.5}$ $Q = \text{caudal en m}^3/\text{seg}$ $L = \text{longitud de la cresta, m}$ $H = \text{cabeza en m}$

Fuente: (Ministerio de Agricultura & ANA, 2010)

Anexo 2. Requisitos para la toma de muestra de aguas y su preservación

Tabla 46

Requisitos para la toma de muestras de aguas y su preservación

Determinación	Recipiente	Volumen mínimo de muestras, mL	Tipo de muestra	Preservación	Almacenamiento máximo recomendado
---------------	------------	--------------------------------	-----------------	--------------	-----------------------------------

Acidez	P, V	100	s	Refrigerar	14 d
Alcalinidad	P, V	200	s	Refrigerar	14 d
Boro	P	100	s, c	No requiere	6 meses
Bromuro	P, V	100	s, c	No requiere	28 d
Carbo orgánico, total	V	100	s, c	Análisis inmediato; o refrigerar y agregar H ₃ PO ₄ O ₂ SO ₄ hasta pH<2	28 d
Cianuro: Total	P, V	500	s, c	Agregar NaOH hasta pH>12, refrigerar en la oscuridad	14 d
Clorable	P, V	500	s, c	Agregar 100 mg Na ₂ S ₂ O ₃ /L	14 d
Cloro residual	P, V	500	s	Análisis inmediato	----
Clorofila	P, V	500	s, c	30 d en la oscuridad	30 d
Cloruro	P, V	50	s, c	No requiere	28 d
Color	P, V	500	s, c	Refrigerar	48 h
Compuestos Orgánicos					
Sustancias activas al azul de metileno	P, V	250	s, c	Refrigerar	48 h
Plaguicidas	V, tapón de TFE	1000	s, c	Refrigerar; agregar 1000 mg ácido ascórbico/L si hay cloro residual	7 días hasta la extracción
Fenoles	P, V	500	s, c	Refrigerar, agregar H ₂ SO ₄ hasta pH<2	40 d después de extraer
Purgables por purga y trampa	V, tapón de TFE	2' 40	s	Refrigerar, agregar HCL hasta pH<2; agregar 1000 mg ácido ascórbico/L si hay cloro residual	14 d
Conductividad	P, V	500	s, c	Refrigerar	28 d
DBO	P, V	1000	s	Refrigerar	48 h
Dióxido de carbono	P, V	100	s	Análisis inmediato	-----
Dióxido de cloro	P, V	500	s	Análisis inmediato	-----
DQO	P, V	100	s, c	Analizar lo más pronto posible, o agregar H ₂ SO ₄	28 d
Dureza	P, V	100	s, c	Agregar HNO ₃ hasta pH<2	6 meses
Fluoruro	P	300	s, c	No requiere	28 d
Fosfato	V	100	s	Para fosfatos disuelto filtrar	48 h

				inmediatamente; refrigerar	
Gas digestor de lodos	V, botella de gases	-----	-----	-----	-----
Grasa y aceite	V, boca ancha calibrado	1000	s, c	Agregar HCL hasta pH<2, refrigerar	28 d
Metales general		500	s	Filtrar, agregar HNO ₃ hasta pH<2	6 meses
Cromo VI	P, V	300	s	Refrigerar	24 h
Cobre, colorimetría	P, V	-----	-----	-----	-----
Mercurio	P, V	500	s, c	Agregar HNO ₃ hasta pH<2, 4° C, refrigerar	28 d
Nitrógeno	-----	-----	-----	-----	-----
Amoniaco	P, V	500	s, c	Analizar lo más pronto posible, o agregar H ₂ SO ₄ hasta pH<2; refrigerar	28 d
Nitrato	P, V	100	s, c	Analizar lo más pronto posible o refrigerar	48 h (28 d para muestras cloradas)
Nitrato + nitrito	P, V	200	s, c	Agregar H ₂ SO ₄ hasta pH<2, refrigerar	28 d
Nitrito	P, V	100	s, c	Analizar lo más pronto posible o refrigerar	48 h
Orgánico, Kjeldahl	P, V	500	s, c	Agregar H ₂ SO ₄ hasta pH<2, refrigerar	28 h
Olor	V	500	s	Analizar lo más pronto posible o refrigerar	-----
Oxígeno disuelto	G, botella de DBO	300	s	-----	-----
Electrodo	-----	-----	-----	-----	-----
Electrodo Winkler	-----	-----	-----	Análisis inmediato. La titulación puede aplazarse después de la acidificación	8 h
Ozono	V	1000	s	Análisis inmediato	-----
pH	P, V	50	s	Análisis inmediato	-----
Sabor	V	500	s	Analizar lo más pronto posible; refrigerar	-----

Salinidad	V, sello de cera	240	s	Análisis inmediato o usar sello de cera	-----
Sílica	P	200	s, c	Refrigerar, no congelar	28 d
Sólidos	P, V	200	s, c	Refrigerar	2-7 d
Sulfato	P, V	100	s, c	Refrigerar	28 d
Sulfuro	P, V	100	s, c	Refrigerar; agregar 4 gotas de acetato de zinc 2N/100 mL; agregar NaOH hasta pH>9	7 d
Temperatura	P, V	-----	s	Análisis inmediato	-----
Turbidez	P, V	100	s, c	Analizar el mismo día; para más de 24 h guardar en oscuridad; refrigerar	48 h
Yodo	P, V	500	s, c	Análisis inmediato	-----

Fuente: (Ministerio de Agricultura & ANA, 2010)



P = plástico

V = vidrio

h = horas

d = días

Anexo 4. Informe de los parámetros químicos y microbiológicos pre, otorgados por el laboratorio NKAP

**LABORATORIO DE ENSAYO
ACREDITADO POR EL ORGANISMO
PERUANO DE ACREDITACIÓN INACAL-
DA CON REGISTRO No LE 026**

INFORME DE ENSAYO
C-136-C216-FNB

Pág. 01 de 03

CLIENTE : TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUALES DOMESTICAS

ATENCION : NUÑEZ BURGA FIORELLA

MÉTODOS DE ENSAYO : Químico, Microbiológico

ITEM DE ENSAYO : Agua Residual

PRESENTACIÓN DE LOS ITEM DE ENSAYO : 01 botella de plástico de 1L., 01 botella de plástico de 500mL., 01 botella de plástico de 250mL., 01 botella de vidrio de 300mL.
Preservadas

MUESTREO : Muestras tomadas por el cliente

LUGAR Y FECHAS DE RECEPCIÓN: Cajamarca, 14 de marzo de 2016 Hora: 16:00

LUGAR Y FECHAS DE EJECUCIÓN : Cajamarca, 14 de marzo de 2016

MÉTODO DE ENSAYO

Parámetro	Norma-Método	Límite de detección	Tiempo máximo de conservación recomendado/obligado
Nitrógeno Total*	APHA 4500-NO3-AE 22nd Ed. 2012	<0.10 mg/L	28d
Fosforo Total*	APHA 4500-P AJLD 22nd Ed. 2012	<0.01 mg/L	28d
Demanda Bioquímica de Oxígeno	SMWW-APHA-APHA-WEF Part 5210 A, 22nd Ed. 2012	<2.0 mg/L	48h
Demanda Química de Oxígeno	SMWW-APHA-APHA-WEF Part 5210 A, C 22nd Ed. 2012	<4.74 mg/L	28d
Coliformes Totales	SMWW-APHA-APHA-WEF Part 9221 B, 22nd Ed. 2012	<1.8 NMP/100mL	24h
Coliformes Fecales	SMWW-APHA-APHA-WEF Part 9221 E-1, 22nd Ed. 2012	<1.8 NMP/100mL	24h

Sello


Fecha Emisión

Jefe Administrativo


Jefe del Laboratorio de Química

Jefe del Laboratorio de Microbiología


22/03/2016



Alexandra Aurazo Rodríguez



Edder Neyra Jaico
CIP 147028



Karen Ahumada Leon
CBE 8083

LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS CORRESPONDEN A LOS ENSAYOS SOLICITADOS PARA LOS ITEM DE ENSAYO RECIBIDOS.
PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL SIN EL PERMISO DE NKAP SRL.
* Todos los resultados de los ensayos son considerados confidenciales.
* Las muestras serán eliminadas al término del tiempo máximo de conservación recomendado/obligado, salvo requerimiento expreso del cliente

INFORME DE ENSAYO

C-136-C216-FNB

Pág. 02 de 03

Código de Laboratorio			C-136-01
Código de Cliente			Puntual-R
Ítem de Ensayo			Agua Residual
Fecha de Muestreo			14/03/2016
Hora de Muestreo			07:30
Parámetro	Símbolo	Unidad	
Nitrógeno Total*	N	mg/L	27.96
Fosforo Total*	P	mg/L	4.06
Demanda Bioquímica de Oxígeno	DBO	mg/L	285.1
Demanda Química de Oxígeno	DQO	mg/L	683.0

(*) Los métodos indicados no han sido acreditados por el INACAL-DA



INFORME DE ENSAYO

C-136-C216-FNB



Pág. 03 de 03

Código de Laboratorio			C-136-01
Código de Cliente			Puntual-R
Ítem de Ensayo			Agua Residual
Fecha de Muestreo			14/03/2016
Hora de Muestreo			07:30
Parámetro	Símbolo	Unidad	
Coliformes Totales	NMP/100mL		79X10 ⁹
Coliformes Fecales	NMP/100mL		79X10 ⁹



Figura 71. Informe del laboratorio NKAP, de los parámetros químicos y microbiológicos antes de pasar por el sistema de tratamiento mediante HAFSH

Anexo 5. Informe de los parámetros químicos y microbiológicos post, otorgados por el laboratorio NKAP

**LABORATORIO DE ENSAYO
ACREDITADO POR EL ORGANISMO
PERUANO DE ACREDITACIÓN INACAL-
DA CON REGISTRO No LE 026**

INFORME DE ENSAYO
C-202-C216-FNB

Pág. 01 de 03

CLIENTE : TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUALES DOMESTICAS

ATENCION : NUÑEZ BURGA FIORELLA

MÉTODOS DE ENSAYO : Químico, Microbiológico

ITEM DE ENSAYO : Agua Residual

PRESENTACIÓN DE LOS ITEM DE ENSAYO : 01 botella de plástico de 1L., 01 botella de plástico de 500mL., 01 botella de plástico de 250mL., 01 botella de vidrio de 300mL.
Preservadas

MUESTREO : Muestras tomadas por el cliente

LUGAR Y FECHAS DE RECEPCIÓN: Cajamarca, 14 de Abril de 2016 Hora: 16:00

LUGAR Y FECHAS DE EJECUCIÓN : Cajamarca, 14 de Abril de 2016

MÉTODO DE ENSAYO


Parámetro	Norma-Método	Límite de detección	Tiempo máximo de conservación recomendado/obligado
Nitrógeno Total*	APHA 800 NCO-AJ, C 22nd Ed., 2012	<0.10 mg/L	28d
Fosforo Total*	APHA 4500-P AJ, C 22nd Ed., 2012	<0.01 mg/L	28d
Demanda Bioquímica de Oxígeno	SM 5211-APHA-AWWA-WEF Part 5070 AJ, 22nd Ed., 2012	<2.0 mg/L	48h
Demanda Química de Oxígeno	SM 5210-APHA-AWWA-WEF Part 5029 A, C 22nd Ed., 2012	<4.74 mg/L	28d
Coliformes Totales	SM 9210-APHA-AWWA-WEF Part 9211 B, 22nd Ed., 2012	<1.8 NMP/100mL	24h
Coliformes Fecales	SM 9210-APHA-AWWA-WEF Part 9211 B-1, 22nd Ed., 2012	<1.8 NMP/100mL	24h

Sello

Fecha Emisión


22/04/2016

Jefe del Laboratorio de Química



Edder Neyra Jaico
CIP 147028

Jefe del Laboratorio de Microbiología



Karen Ahumada Leon
CBP 8083

LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS CORRESPONDEN A LOS ENSAYOS SOLICITADOS PARA LOS ITEM DE ENSAYO RECIBIDOS.
PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL SIN EL PERMISO DE NKAP SRL.

*Todos los resultados de los ensayos son considerados confidenciales.
* Las muestras serán eliminadas al término del tiempo máximo de conservación recomendado/ obligado, salvo requerimiento expreso del cliente
* Informes de ensayo no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

C-202-C216-FNB
INFORME DE ENSAYO
 C-202-C216-FNB

Pág. 02 de 03

Código de Laboratorio			C-202-01
Código de Cliente			Puntual-R
Ítem de Ensayo			Agua Residual
Fecha de Muestreo			04/04/2016
Hora de Muestreo			08:30
Parámetro	Símbolo	Unidad	
Nitrógeno Total*	N	mg/L	6.27
Fosforo Total*	P	mg/L	0.49
Demanda Bioquímica de Oxígeno	DBO	mg/L	12.38
Demanda Química de Oxígeno	DQO	mg/L	30.45

(*) Los métodos indicados no han sido acreditados por el INACAL-DA



C-202-C216-FNB
INFORME DE ENSAYO
 C-202-C216-FNB

Pág. 03 de 03

Código de Laboratorio			C-202-01
Código de Cliente			Puntual-R
Ítem de Ensayo			Agua Residual
Fecha de Muestreo			04/04/2016
Hora de Muestreo			08:30
Parámetro	Símbolo	Unidad	
Coliformes Totales	NMP/100mL		4X10 ³
Coliformes Fecales	NMP/100mL		1X10 ³



Figura 72. Informe del laboratorio NKAP, de los parámetros químicos y microbiológicos después de pasar por el sistema de tratamiento mediante HAFSH

Anexo 6. Planos del sistema de tratamiento desde el baño hasta el HA, corte A-A

Anexo 7. Planos del sistema de tratamiento desde el baño hasta el HAFSH, corte planta

Anexo 8. Planos del HAFSH

Anexo 9. Construcción del sistema de tratamiento de HAFSH



Figura 73. Limpieza del lugar para la implementación del sistema de tratamiento, mediante HAFSH



Figura 74. Excavación para las zanjas



Figura 75. Zanjas terminadas



Figura 76. Excavación de la cámara de lodos



Figura 77. Excavación de la cama del biodigestor



Figura 78. Excavación terminada de la Cama del biodigestor y cámara de lodos



Figura 79. Instalación de tuberías



Figura 80. Construcción de la cámara de registro



Figura 81. Cámara de registro terminado



Figura 82. Biodigestor instalado



Figura 83. Construcción de la cámara de lodos



Figura 84. Cámara de lodos terminado



Figura 85. Excavación y compactación del HA



Figura 86. Revestimiento con plástico al HAFSH



Figura 87. Cerco perimétrico de ladrillo alrededor del humedal para evitar que el lecho filtrante arrastre al plástico.



Figura 88. Llenado del lecho filtrante con arena



Figura 89. Llenado del lecho filtrante con grava



Figura 90. Excavación para la plantación de la especie Papiro



Figura 91. Plantación del Papiro



Figura 92. Implementación del HAFSH terminado



Figura 93. Colocación de capa de grava mediana al biodigestor para evitar que los aros de plástico (PETS) sean arrastrados por la tubería de salida y obstruyan el proceso



Figura 94. Llenado de agua no potable al biodigestor para realizar la prueba hidráulica



Figura 95. Salida del agua residual de todo el proceso de tratamiento

Anexo 10. Toma de muestras de los análisis físico-químicos y microbiológicos antes de ingresar al sistema de tratamiento mediante HAFSH



Figura 96. Toma de muestra para los parámetros físicos (Turbidez, pH, oxígeno disuelto, temperatura, sólidos disueltos totales y conductividad eléctrica)



Figura 97. Toma de muestra del parámetro DBO



Figura 98. Toma de muestra del parámetro DQO



Figura 99. Toma de muestra del parámetro Fósforo Total



Figura 100. Toma de muestra del parámetro Nitrógeno Total



Figura 101. Toma de muestra del parámetro Coliformes Totales y Fecales

Anexo 11. Toma de muestra de los análisis físico-químicos y microbiológicos después de ingresar al sistema de tratamiento mediante HSFH



Figura 102. Toma del agua residual doméstica después de pasar por el sistema de tratamiento de HAFSH



Figura 103. Toma de muestra de los parámetros físicos (Turbidez, pH, oxígeno disuelto, temperatura, sólidos disueltos totales y conductividad eléctrica)



Figura 104. Toma de muestra del parámetro DQO



Figura 105. Toma de muestra del parámetro DBO



Figura 106. Toma de muestra del parámetro Fósforo Total



Figura 107. Toma de muestra del parámetro Nitrógeno Total



Figura 108. Toma de muestra del parámetro microbiológico Coliformes Totales y Fecales

Anexo 12. Toma de muestra de agua residual doméstica con un tiempo de retención de 12 días



Figura 109. Toma de muestra de agua residual con 12 días de retención

Anexo 13. Análisis de los parámetros físicos antes de pasar por el sistema de tratamiento de HAFSH



Figura 110. Análisis de la turbidez (UNT)



Figura 111. Análisis del pH

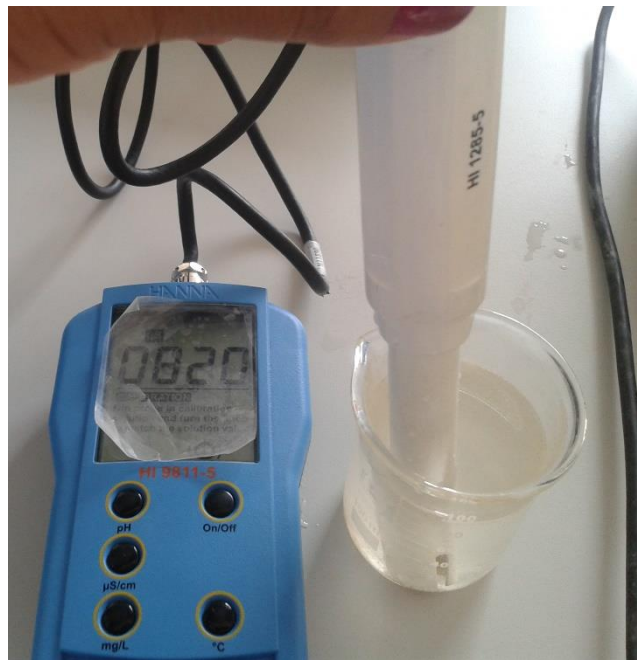


Figura 112. Análisis de la conductividad



Figura 113. Análisis de SDT

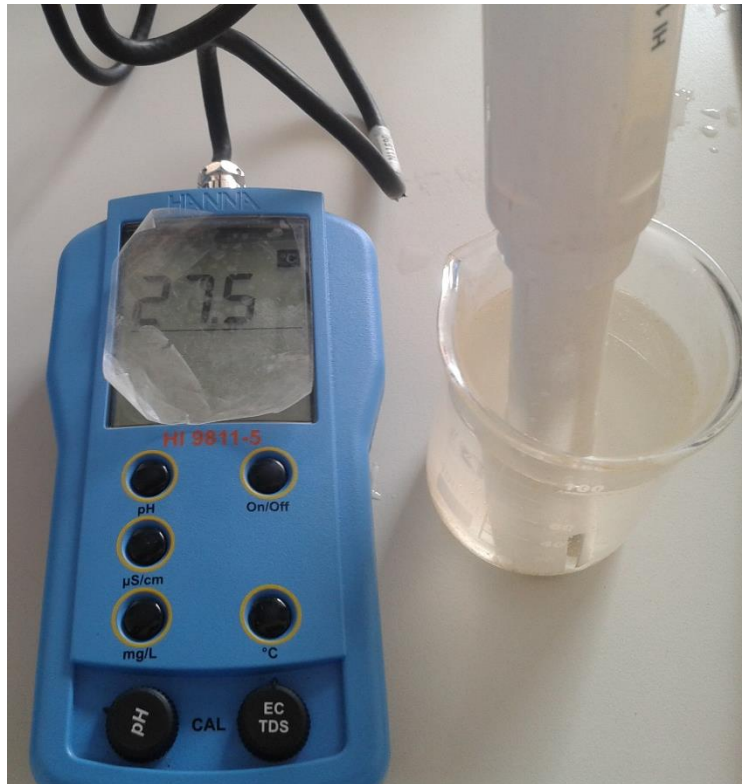


Figura 114. Análisis de la Temperatura

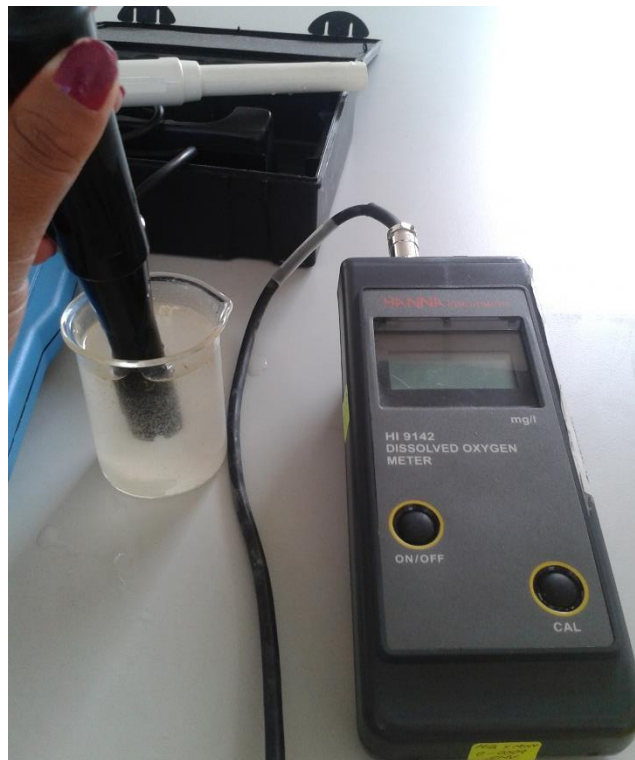


Figura 115. Análisis del OD

Anexo 14. Análisis de los parámetros físicos después de pasar por el sistema de tratamiento de HAFSH

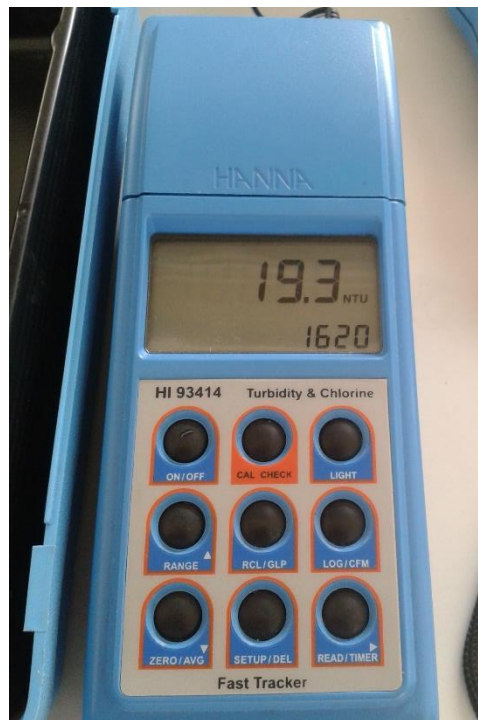


Figura 116. Análisis de la Turbidez



Figura 117 Análisis del pH

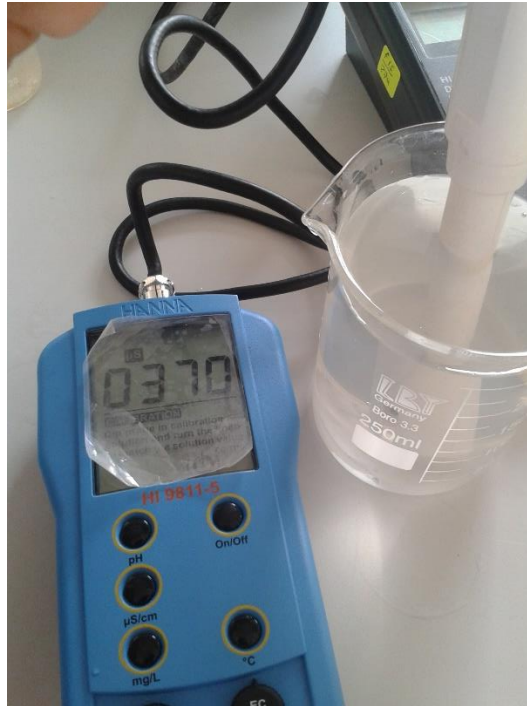


Figura 118. Análisis de la Conductividad



Figura 119. Análisis de SDT



Figura 120. Análisis de la Temperatura



Figura 121. Análisis del OD

Anexo 15. Comparación del agua residual domésticas antes y después del tratamiento de HAFSH



Figura 122. Comparación del agua antes y después del tratamiento