

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL



TESIS

**“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE HUMEDALES
ARTIFICIALES EN LA REMOCIÓN DE NITRÓGENO”.**

**PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO SANITARIO**

ELABORADO POR:

LUIS ALBERTO MALDONADO CUEVA

ASESOR:

ING. OTTO BRUNO ROSASCO GERKES

LIMA – PERÚ

2018

DEDICATORIA

A Dios.

Por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.

A mi madre Elizabeth.

Por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada, por su amor.

A mi padre Luis Ernesto.

Por los ejemplos de perseverancia y constancia que lo caracterizan y que me ha infundado siempre, por el valor mostrado para salir adelante y por su amor.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la UNI, por haber sido mi centro de formación profesional donde pasé momentos inolvidables y donde aprendí a fijar mis metas de manera exigente, también agradezco a mi facultad FIA-UNI por haber sido uno de los principales financistas del desarrollo de esta investigación, a mis padres por darme el aliento necesario, a mis profesores, amigos de la facultad y al CITRAR-UNI por haberme ayudado a desarrollar exitosamente mi tesis.

También quiero agradecer en forma especial a mi asesor de tesis, al Ing. Otto Bruno Rosasco Gerkes, por haberme guiado durante el desarrollo de mi investigación

IV
ÍNDICE

<i>RESUMEN</i>	<i>XVII</i>
<i>ABSTRACT</i>	<i>XIX</i>
<i>CAPÍTULO I – INTRODUCCIÓN</i>	<i>1</i>
1.1 Introducción	1
<i>CAPÍTULO II – ANTECEDENTES</i>	<i>3</i>
2.1. Antecedentes	3
2.2. Formulación del Problema	5
2.2.1 Descripción del Problema	5
2.3. Justificación	6
2.4. Objetivos	7
2.4.1. Objetivos General	7
2.4.2. Objetivos Específicos	7
2.5. Hipótesis	7
2.6. Variables	7
<i>CAPÍTULO III – MARCO TEÓRICO</i>	<i>9</i>
3.1. Humedales artificiales	9
3.2. Clasificación de los humedales artificiales	10
3.2.1. Según las macrófitas que se empleen	10
3.2.2. Humedales artificiales de flujo superficial	11
3.2.3. Humedales de flujo subsuperficial	12

3.3. Mecanismos de remoción de contaminantes en humedales artificiales	18
3.3.1 Remoción de sólidos suspendidos	18
3.3.2 Remoción de materia orgánica	19
3.3.3 Remoción de nitrógeno	19
3.3.4 Remoción de fósforo	22
3.3.5 Remoción de bacterias	22
3.4. Eliminación biológica de nitrógeno de las aguas residuales	23
3.4.1 Nitrificación y desnitrificación vía nitrato	23
3.4.2 Ventajas y desventajas de los humedales artificiales	27
3.5. La Typha Spp como Planta Fitodepuradora	29
3.5.1 Morfología de la Typha Spp	29
3.5.2 Los juncos en el tratamiento de aguas residuales	31
3.5.3 Eficiencia depuradora de los juncos en los meses de invierno	31
3.5.4 Rendimiento óptimo de las raíces y horas del micrófito	31
3.5.5 Manejo de los Juncos en los humedales	32
3.5.6 Operación	32
3.5.7 Plagas y enfermedades	33
3.5.8 Materia Orgánica	33
<i>CAPÍTULO IV – MARCO NORMATIVO</i>	35
4.1 Lineamiento y Dispositivos Ambientales	35
<i>CAPÍTULO V – METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN</i>	36
5.1 Lugar de Evaluación	36
5.2 Diseño y dimensionamiento de los Humedales Piloto	38

5.3	Materiales, Reactivos y Equipos	39
5.4	Cronograma de desarrollo	40
5.5	Frecuencia del Monitoreo.	44
5.6	Métodos y Equipos de Laboratorio.	45
<i>CAPÍTULO VI – RESULTADOS</i>		46
6.1	Análisis de la remoción de Humedad Relativa	46
6.2	Análisis de la remoción de Nitrógeno Total	50
6.3	Análisis de la remoción del Nitrógeno Amoniacal	55
6.4	Análisis de remoción de Nitritos	60
6.5	Análisis de remoción de Nitratos	64
6.6	Análisis de remoción de DQO	69
6.7	Análisis de remoción de Fósforo Total	74
6.8	Análisis de remoción de Turbiedad	78
6.9	Análisis de la variación del pH	84
6.10	Análisis de la variación de la Temperatura Ambiental	88
6.11	Análisis de la variación de la Temperatura del agua	92
6.12	Análisis de la variación de la Conductividad Eléctrica	97
6.13	Análisis de la variación Oxígeno Disuelto	100
<i>CAPITULO VII DISCUSIÓN DE RESULTADOS</i>		114
7.1	Discusión de Resultados	114

VII

<i>CAPITULO VIII CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</i>	<i>119</i>
8.1 Conclusiones	119
8.2 Recomendaciones	121
<i>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</i>	<i>122</i>
<i>ANEXO 1 – GALERÍA DE FOTOS</i>	<i>126</i>
<i>ANEXO 2 - MEDICIÓN DE PARÁMETROS</i>	<i>134</i>

DEFINICIONES

Agua residual doméstica: Agua de origen doméstico que contiene desechos fisiológicos y otros provenientes de la actividad humana.

Aforo volumétrico de aguas: El aforo volumétrico consiste en medir el tiempo que toma el agua en llenar un recipiente de volumen conocido para poder determinar el caudal. Esto sirve para poder controlar y calibrar el caudal del afluente.

Bacterias nitrificantes: Se considera bacterias nitrificantes a todas aquellas que convierten el amoníaco en amonio, o el nitrito en nitrato como parte del ciclo del nitrógeno.

Bacterias des-nitrificantes: Las bacterias desnitrificantes son bacterias autótrofas aeróbicas o heterótrofas que pueden transformarse para tener un crecimiento anaeróbico cuando se usa el nitrato como aceptador de electrones.

Biopelícula: Película biológica adherida a un medio sólido y que podría llevar a cabo la degradación de la materia orgánica.

Evapotranspiración: Cantidad de agua que vuelve a la atmósfera como consecuencia de la evaporación y de la transpiración de las plantas.

Humedal artificial: Los humedales artificiales son zonas construidas por el hombre en las que, de forma controlada, se reproducen mecanismos de eliminación de contaminantes presentes en aguas residuales, que se dan en los humedales naturales mediante procesos físicos, biológicos y químicos.

Microorganismos Patógenos: Son microorganismos son capaces de penetrar y multiplicarse en otros seres vivos, a los que perjudican, originando una infección.

Plantas Macrófitas: Son aquellas que pueden vivir en terrenos inundados durante toda su vida o encharcadas durante largos períodos de tiempo.

Proceso de Nitrificación: La Nitrificación es la oxidación biológica del amonio a nitrato por microorganismos aerobios que usan el oxígeno molecular (O₂) como aceptor de electrones, es decir, como oxidante.

Proceso de Desnitrificación: La desnitrificación es la transformación biológica del nitrato en gas nitrógeno, óxido nítrico y óxido nitroso. Éstos son compuestos gaseosos y no son fácilmente accesibles para el crecimiento microbiano; por ello, se liberan normalmente en la atmósfera.

Tóxico: Característica de elementos o compuestos químicos capaces de ocasionar daño por contacto o acción sistémica a plantas, animales y al hombre.

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Síntesis clasificación de humedales</i>	<i>11</i>
<i>Figura 2. Humedal artificial de flujo superficial.....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 3. Humedal Subsuperficial de flujo horizontal.</i>	<i>13</i>
<i>Figura 4. Humedal subsuperficial de flujo vertical.....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 5. Diagrama del metabolismo del nitrógeno</i>	<i>20</i>
<i>Figura 6. Transformaciones del Nitrógeno en las aguas residuales</i>	<i>24</i>
<i>Figura 7. Corte transversal del tallo de la Typha Spp</i>	<i>29</i>
<i>Figura 8. Composición del agua residual doméstico</i>	<i>33</i>
<i>Figura 9. Degradación de Materia Orgánica</i>	<i>34</i>
<i>Figura 10. Ubicación del proyecto</i>	<i>36</i>
<i>Figura 11. Diagrama de flujo de la investigación</i>	<i>37</i>
<i>Figura 12. Gráfico de líneas de la Variación de la humedad Relativa Vs. Tiempo</i>	<i>48</i>
<i>Figura 13. Gráfico de Barras de la Variación de la Humedad Relativa Vs. Tiempo.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 14. Gráfico de Líneas de la Remoción de Nitrógeno Total Vs. Tiempo</i>	<i>52</i>
<i>Figura 15. Gráfico de Barras de la Remoción de Nitrógeno Total Vs. Tiempo</i>	<i>53</i>
<i>Figura 16. Gráfico de Líneas de la Remoción de Nitrógeno Amoniacal Vs. Tiempo</i>	<i>57</i>
<i>Figura 17. Gráfico de Barras en la Remoción de Nitrógeno Amoniacal Vs. Tiempo.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 18. Gráfico de Líneas en la Remoción de Nitritos Vs. Tiempo</i>	<i>62</i>
<i>Figura 19. Gráfico de Barras en la Remoción de Nitritos Vs. Tiempo.....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 20. Gráfico de Líneas en la Remoción de Nitratos Vs. Tiempo</i>	<i>66</i>
<i>Figura 21. Gráfico de Barras en la Remoción de Nitratos Vs. Tiempo</i>	<i>67</i>
<i>Figura 22. Gráfico de Líneas en la Remoción de la DQO</i>	<i>72</i>
<i>Figura 23. Gráfico de Barras en la Remoción de la DQO Vs. Tiempo</i>	<i>73</i>

<i>Figura 24. Gráfico de Líneas en la Remoción de Fósforo Total Vs. Tiempo</i>	76
<i>Figura 25. Gráfico de Barras en la Remoción de Fósforo Total Vs. Tiempo</i>	77
<i>Figura 26. Gráfico de Líneas en la Remoción de la turbiedad Vs. Tiempo</i>	82
<i>Figura 27. Gráfico de Barras en la Remoción de la turbiedad Vs. Tiempo</i>	83
<i>Figura 28. Variación del pH</i>	86
<i>Figura 29.– Gráfico de Líneas en la Variación de la Temperatura Ambiental Vs. Tiempo</i>	90
<i>Figura 30. Gráfico de Barras en la Variación de la Temperatura Ambiental Vs. Tiempo</i>	91
<i>Figura 31. Gráfico de líneas de la Variación de la Temperatura Vs. Tiempo</i>	95
<i>Figura 32. Gráfico de Barras de la Variación de la Temperatura Vs. Tiempo</i>	96
<i>Figura 33. Variación de la Conductividad Eléctrica</i>	99
<i>Figura 34. Variación del oxígeno disuelto</i>	102
<i>Figura 35. Variación del Oxígeno Disuelto en el tiempo por tramo en el Humedal 1.</i>	103
<i>Figura 36. Variación del Oxígeno Disuelto en el tiempo por tramo en el Humedal 2.</i>	104
<i>Figura 37. Oxígeno disuelto en el Humedal 3 bajo la condición 1 en los tres tramos.</i>	106
<i>Figura 38. Oxígeno disuelto en el Humedal 3 bajo la condición 1 en los tres tramos.</i>	107
<i>Figura 39. Oxígeno disuelto en el Humedal 3 bajo la condición 2 en los tres tramos.</i>	109
<i>Figura 40. Oxígeno disuelto en el Humedal 3 bajo la condición 3 en los tres tramos.</i>	111
<i>Figura 41. Oxígeno disuelto en el Humedal 3 bajo la condición 3 en los tres tramos.</i>	112
<i>Figura 42. Armado del humedal</i>	126
<i>Figura 43. Habilitación del humedal</i>	127
<i>Figura 44. Toma de muestras de O.D. en puntos intermedios del Humedal.</i>	127
<i>Figura 45. Caudal de abastecimiento al humedal</i>	128
<i>Figura 46. Humedal Antiguo (H1)</i>	128

<i>Figura 47. Humedal Nuevo (H2)</i>	129
<i>Figura 48. Humedal con Aireación Intermitente (H3)</i>	129
<i>Figura 49. Punto de Muestreo del Efluente en el Humedal H2</i>	130
<i>Figura 50. Análisis de turbiedad</i>	130
<i>Figura 51. Determinación de pH</i>	131
<i>Figura 52. Determinación de OD</i>	131
<i>Figura 54. Oxídímetro, equipo de medición de OD</i>	132
<i>Figura 53. Purga de lodos</i>	132
<i>Figura 55. Macrófitas del humedal</i>	133
<i>Figura 56. Turbidímetro de laboratorio</i>	134
<i>Figura 57. Vista del Termo hidrómetro</i>	135
<i>Figura 58. Equipo Multiparámetro de pH y Temperatura</i>	136
<i>Figura 59. Conductímetro</i>	136
<i>Figura 60. Termo hidrómetro</i>	137
<i>Figura 61. Diagrama de flujo de Metodología para medición de DBO (Método de las diluciones).</i>	138
<i>Figura 62. Encender Digestor de DQO</i>	140
<i>Figura 63. Rotulado de los viales</i>	140
<i>Figura 64. Pipeteo de Muestras</i>	140
<i>Figura 65. Mantener la muestra con un ángulo de 45'</i>	140
<i>Figura 66. Cierre hermético el tapón del vial</i>	140
<i>Figura 67. Agitación de los viales</i>	140
<i>Figura 68. Colorímetro para resultados de DQO</i>	140
<i>Figura 69. Adición de la primera almohadilla al vial para preparar la muestra y el blanco</i>	142

XII

<i>Figura 70. Muestra y blanco después del digestor.....</i>	<i>142</i>
<i>Figura 71. Adición de un segundo y tercer reactivo a la muestra y al blanco</i>	<i>142</i>
<i>Figura 72. Pipeteo de 2ml de la muestra y el blanco para adicionar a un tercer vial y calibración con la lectura del blanco en el colorímetro</i>	<i>143</i>
<i>Figura 73. Lectura final de la muestra</i>	<i>143</i>
<i>Figura 74. Adición de la muestra junto con la almohadilla para la medición.....</i>	<i>144</i>
<i>Figura 75. Calibración del colorímetro con el blanco.....</i>	<i>144</i>
<i>Figura 76. Medición de la muestra en el colorímetro</i>	<i>144</i>
<i>Figura 77. Inicio y calibración del Colorímetro DR-890 con el blanco</i>	<i>145</i>
<i>Figura 78. Agitación de la muestra para su lectura</i>	<i>145</i>
<i>Figura 79. Programación del colorímetro y adición de la muestra y el blanco a los viales</i>	<i>146</i>
<i>Figura 80. Adición de dos almohadillas y agitación de la muestra y el blanco.....</i>	<i>146</i>
<i>Figura 81. Calibración del colorímetro con el blanco y medición de la muestra.....</i>	<i>146</i>

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Contaminantes importantes de interés en el tratamiento de las aguas residuales.</i>	15
<i>Tabla 2. Características de las especies vegetales más utilizadas en humedales artificiales</i>	17
<i>Tabla 3. Mecanismos de remoción en los sistemas de tratamiento basados en macrófitas.</i>	18
<i>Tabla 4. Comparación entre diferentes sistemas de flujo humedal</i>	28
<i>Tabla 5. Comparación entre humedales artificiales de flujo</i>	28
<i>Tabla 6. Diseño hidráulico de humedales</i>	38
<i>Tabla 7. Frecuencia del monitoreo</i>	44
<i>Tabla 8. Métodos y equipos utilizados en la medición</i>	45
<i>Tabla 9. Medición de Humedad Relativa por Semanas</i>	46
<i>Tabla 10. Cuadro Resumen HR (%) semanal</i>	47
<i>Tabla 11. Eficiencia de Remoción Nitrógeno Total</i>	50
<i>Tabla 12. Resumen Nitrógeno Total semanal</i>	51
<i>Tabla 13. Eficiencia de Remoción del Nitrógeno Amoniacal</i>	55
<i>Tabla 14. Cuadro resumen Nitrógeno Amoniacal semanal</i>	56
<i>Tabla 15. Eficiencia de Remoción de los Nitritos</i>	60
<i>Tabla 16. Cuadro resumen Nitritos semanal</i>	61
<i>Tabla 17. Desviación estándar remoción de Nitritos</i>	61
<i>Tabla 18. Eficiencia de Remoción de los Nitratos</i>	64
<i>Tabla 19. Resumen Semanal Remoción de Nitratos</i>	65

<i>Tabla 20.Desviación Estándar Remoción de Nitratos</i>	65
<i>Tabla 21.Eficiencia de la remoción de DQO</i>	69
<i>Tabla 22.- Resumen Remoción de DQO semanal</i>	71
<i>Tabla 23.Eficiencia de Remoción del Fósforo Total</i>	74
<i>Tabla 24.Resumen Fósforo Total semanal</i>	75
<i>Tabla 25 – Desviación Estándar Fósforo Total</i>	75
<i>Tabla 26.Eficiencia de Remoción de la Turbiedad</i>	80
<i>Tabla 27 – Resumen Remoción Semanal Turbiedad</i>	81
<i>Tabla 28 – Desviación estándar</i>	81
<i>Tabla 29 – Variación del pH semanal por Humedal</i>	84
<i>Tabla 30 – Resumen Variación del pH</i>	85
<i>Tabla 31 – Temperatura Ambiental</i>	88
<i>Tabla 32 - Resumen T° Ambiente por periodo</i>	89
<i>Tabla 33 – Desviación Estándar</i>	89
<i>Tabla 34 - Temperatura del agua</i>	92
<i>Tabla 35 – Resumen de la variación de la Temperatura del Agua</i>	94
<i>Tabla 36 – Variación de la Conductividad Eléctrica</i>	97
<i>Tabla 37 – Resumen de la Variación de la Conductividad Eléctrica</i>	98
<i>Tabla 38 – Consumo del Oxígeno Disuelto</i>	101
<i>Tabla 39 – Humedal 01 (Antiguo)</i>	103
<i>Tabla 40 – Humedal 2 (Nuevo)</i>	104
<i>Tabla 41 – Humedal 3 – Condición 1</i>	105
<i>Tabla 42.Oxígeno Disuelto Viernes 06/05/2016</i>	106
<i>Tabla 43.Oxígeno Disuelto Viernes 13/05/2016</i>	107
<i>Tabla 44. Humedal 3 – Condición</i>	108

<i>Tabla 45 – Oxígeno Disuelto Viernes 17/06/2016.....</i>	<i>108</i>
<i>Tabla 46 - Humedal 3 – Condición 3</i>	<i>110</i>
<i>Tabla 47 – Oxígeno Disuelto Miércoles 27/072016</i>	<i>111</i>
<i>Tabla 48 – Oxígeno Disuelto Miércoles 05/08/2016</i>	<i>112</i>

Índice de fórmulas

<i>Fórmula 1. Nitrosificación</i>	20
<i>Fórmula 2. Nitrificación</i>	21
<i>Fórmula 3. Desnitrificación</i>	21
<i>Fórmula 4. Nitrificación etapa 1 y 2</i>	24
<i>Fórmula 5. Oxidación de amonio</i>	25
<i>Fórmula 6. Reacción de síntesis celular</i>	25
<i>Fórmula 7. Reacción global de la nitrificación</i>	25
<i>Fórmula 8. Desnitrificación con metanol como fuente de carbono orgánico</i>	27

RESUMEN

El objetivo de la presente tesis de investigación fue evaluar los mecanismos de los humedales artificiales para remover Nitrógeno del agua residual doméstica. La evaluación consistió en comparar cómo varía la capacidad de un humedal para remover nitrógeno al variar dos condiciones: 1) antigüedad del humedal, y 2) oxigenación del humedal.

Con este propósito, se construyeron 03 humedales en paralelo, de dimensiones $L=2.00\text{m}$, $a=0.5\text{m}$ y $h=0.5\text{m}$, estos fueron: un humedal convencional recién construido usado como BLANCO (H_2), un humedal convencional en funcionamiento con 01 año de antigüedad (H_1), y un humedal convencional recién construido al que se le instaló un sistema de aireación intermitente (H_3). Los 03 tuvieron la siguiente composición: zonas de entrada y salida de grava canto rodado de 3" y zona de tratamiento de grava canto rodado de 2". La macrófita utilizada fue el Junco (*Thypha spp*). El Tiempo de Retención Hidráulico fue de 24 horas aproximadamente. El caudal del afluente fue de 104 ml/min para cada uno y este se captó a la salida del reactor UASB de CITRAR.

Los parámetros evaluados fueron: turbiedad, temperatura, pH, humedad relativa, temperatura ambiente, conductividad, nitrógeno total, nitrógeno amoniacal, nitritos, nitratos, fósforo total, DQO, OD y sólidos.

En la primera evaluación, se comparó la capacidad para remover nitrógeno de un humedal antiguo (H_1) respecto a uno nuevo (H_2). Para este caso, el periodo de arranque tuvo una duración de 06 semanas (de la semana 05 a la semana 10), mientras que la fase experimental tuvo una duración de 24 Semanas. En la fase experimental se distinguen 02 sub-fases, la primera sub-fase comprende desde la semana 11 a la semana 17, y la segunda sub-fase comprende desde la semana 18 hasta la semana 34. Durante la primera sub-fase, la cual corresponde a la fase en la cual se comparó el humedal antiguo con el nuevo, se encontró un valor promedio de Nitrógeno Total de 69 mg/l en el afluente, mientras que en el efluente de H_1 fue de 56 mg/l y en H_2 fue de 63 mg/l. Asimismo, el valor promedio del Nitrógeno Amoniacal en el afluente fue de 54 mg/l, mientras que en el efluente de H_1 fue de 47 mg/l, y en H_2 fue de 53 mg/l. Se concluyó que H_1 tiene mayor capacidad de remover Nitrógeno que H_2 debido a que las raíces de los juncos de H_1 son más gruesas y permiten una mayor oxigenación del agua residual.

XVIII

En la segunda evaluación, se comparó la capacidad de remover nitrógeno de un humedal con aireación intermitente (**H₃**) respecto a uno convencional (**H₂**). Para este caso, el periodo de arranque o puesta en marcha tuvo 03 fases. En la primera fase (de la semana 05 hasta la semana 10) se utilizó un periodo de aireación de 6 horas ON y 6 horas OFF, en la segunda fase (de la semana 11 hasta la semana 16) se utilizó un periodo de aireación de 3 horas ON y 3 horas OFF, y en la tercera fase (de la semana 17 hasta la semana 22) se utilizó un periodo de aireación de 2 horas ON y 4 horas OFF. Cada fase tuvo una duración de 06 semanas, resultando un periodo de arranque total de 18 semanas. La máxima eficiencia de remoción de Nitrógeno se produjo en la fase 3. Asimismo, la fase experimental tuvo una duración de 12 Semanas (de la semana 23 a la semana 34), donde se encontró un valor promedio de Nitrógeno Total de 44 mg/l en el afluente, mientras que en el efluente de **H₂** fue de 37 mg/l y en **H₃** fue de 24 mg/l. Asimismo, el valor promedio del Nitrógeno Amoniacal en el afluente fue de 38 mg/l, mientras que en el efluente de **H₂** fue de 32 mg/l, y en **H₃** fue de 4 mg/l. Se concluyó que la eficiencia de **H₃** para remover Nitrógeno es mucho mayor a la de **H₂**, debido a que se mejoró el proceso de Nitrificación y Desnitrificación en **H₃** debido a la aireación intermitente.

El estudio se realizó por un periodo total de 38 semanas, de las cuales las 04 primeras semanas corresponden al periodo de construcción e instalación de los humedales, las siguientes 18 semanas corresponden al periodo de puesta en marcha y elección de los ciclos de aireación y no aireación del **H₃**, las subsecuentes 12 semanas corresponden a la etapa experimental y de recopilación de datos, y las últimas 04 semanas corresponden al periodo de cierre del proyecto.

ABSTRACT

The objective of this research thesis was to evaluate the mechanisms of artificial wetlands to remove Nitrogen from domestic wastewater. The evaluation consisted of comparing how the capacity of a wetland to remove nitrogen varies when two conditions vary: 1) Wetland's age, and 2) Wetland's Oxygenation.

For this purpose, 03 wetlands were built in parallel, of dimensions $L = 2.00\text{m}$, $a = 0.5\text{m}$, and $h = 0.5\text{m}$, these were: a new conventional wetland used as BLANK (H2), a conventional wetland that has been operating 01 year ago (H1), and a new conventional wetland with an intermittent aeration system (H3). These three wetlands had the following composition: entry and exit areas of 3 inches boulder and treatment area of 2 inches boulder gravel. The macrophyte used was the Junco (*Thypha* spp). The Hydraulic Retention Time was approximately 24 hours. The affluent flow was 104 ml / min for each one and this was captured at the exit of the CITRAR UASB reactor.

Parameters evaluated were: Turbidity, Temperature, pH, Relative humidity, Ambient temperature, conductivity, total nitrogen, ammonia nitrogen, nitrites, nitrates, total phosphorus, COD, OD and solids.

In the first evaluation, ability to remove nitrogen from an old wetland (H1) regarding a new one (H2) was compared. For this case, the start-up period lasted for 06 weeks (since 5th week until 10th week), while the experimental phase lasted 24 weeks. In the experimental phase, 02 sub-phases are distinguished, the first sub-phase comprises since 11th week until 17th week, and the second sub-phase comprises since 18th week until 34 th week. During the first sub-phase, which corresponds to the phase in which the old wetland was compared with the new one, it was found an average value of Total Nitrogen of 69 mg/l in the affluent, while in the effluent of H1 was 56 mg/l and in H2 it was 63 mg/l. Likewise, the average value of the Ammonia Nitrogen in the affluent was 54 mg/l, while in the effluent of H1 it was 47 mg/ l, and in H2 it was 53 mg/l. It was concluded that H1 has greater capacity to remove Nitrogen than H2 because the roots of reeds of H1 are thicker and allow a greater oxygenation of the wastewater.

In the second evaluation, it was compared the ability to remove nitrogen from a wetland with intermittent aeration (H3) respect to a conventional wetland (H2). In this case, the start-

XX

period had 3 phases. In the first phase (since 5th week until 10th week) it was used an aeration period of 6 hours ON and 6 hours OFF, in the second phase (since 11th week until 16th week) was used an aeration period of 3 hours ON and 3 hours OFF, and in the third phase (since 17th week until 22th week) it was used an aeration period of 2 hours ON and 4 hours OFF. Each phase lasted for 6 weeks, resulting in a total starting period of 18 weeks. The highest efficiency of Nitrogen removal occurred in phase 3. Likewise, the experimental phase lasted 12 Weeks (since 23th week until 34th week), where an average Total Nitrogen value of 44 mg/l was found in the affluent, while in the effluent of H2 it was 37 mg/l and in H3 it was 24 mg/l. Also, the average value of Ammonia Nitrogen in the affluent was 38 mg/l, while in the effluent of H2 it was 32 mg/l, and in H3 it was 4 mg/l. It was concluded that the efficiency of H3 to remove Nitrogen is higher than H2, due to the improvement of the Nitrification and Denitrification process in H3 with the intermittent aeration.

The study was carried out for a total period of 38 weeks, of which the first 04 weeks correspond to the period of construction and installation of the wetlands, the following 18 weeks correspond to the start-up period and election of the aeration and no-aeration cycles of H3, the next 12 weeks correspond to the experimental phase and data collection stage, and the last 04 weeks correspond to the project closing period.

CAPÍTULO I – INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

En las últimas décadas, la falta de tecnología y de una adecuada gestión para la remoción de nitrógeno en aguas residuales en zonas rurales, ha originado que en muchas partes de nuestro país no se cumplan con los LMP y ECAs para Nitrógeno, situación que ha traído graves problemas de toxicidad y eutrofización en cuerpos de agua, siendo el caso más notorio el grave problema ambiental por el que atraviesa el lago Titicaca debido al exceso de nutrientes.

Asimismo, es bien sabido que los humedales artificiales son sistemas de tratamiento de agua fáciles de operar y mantener; sin embargo, en la actualidad existe mucha controversia acerca de su capacidad para remover Nitrógeno del agua residual. Por un lado, están quienes afirman que los humedales tienen la capacidad de remover nitrógeno mediante la alimentación de las macrófitas o mediante el ciclo de nitrificación-desnitrificación que se produce en el lecho. Por otro lado, hay quienes aseguran que la remoción de nitrógeno mediante estos mecanismos es muy poca, y se considera despreciable.

En este sentido, la presente tesis experimental busca dar otras alternativas de tratamiento frente a los problemas ambientales originados por el exceso de nitrógeno en aguas residuales domésticas, mediante el uso apropiado de humedales artificiales como tratamiento secundario. Asimismo, evaluar la eficiencia de los humedales para remover nitrógeno del agua residual, operados bajo diferentes condiciones.

Esta investigación tuvo una duración de 9 meses y se llevó a cabo dentro de las instalaciones del Centro de Investigación de Tratamiento de Aguas Residuales y Residuos Sólidos de la Universidad Nacional de Ingeniería (CITRAR-UNI), donde se aprovechó el efluente del UASB como afluente para nuestro sistema de tratamiento.

Para esto, se realizó la construcción de tres humedales artificiales de flujo horizontal y tipo sub-superficial a escala piloto, cada uno con una característica diferente: Un humedal convencional nuevo, un humedal convencional antiguo (con 1 año de antigüedad) y un humedal con aireación intermitente; conectados en paralelo con el fin de evaluar independientemente la eficiencia de tratamiento de cada uno y luego comparar los resultados.

Uno de los aportes de esta investigación es que se realizó la medición de todas las formas en el que el nitrógeno puede estar presente en el agua residual, que son: Nitrógeno Amoniacal, Nitritos, Nitratos, Nitrógeno Total, y por diferencia el Nitrógeno orgánico. Esto nos permite

tener datos de eficiencia de cada parámetro. De esta manera se puede determinar cuáles son los mecanismos que predominan en los humedales para la remoción del nitrógeno, cuáles son los factores limitantes, y cómo podrían mejorar su eficiencia.

Además, se realizó la medición de diversos parámetros fisicoquímicos y biológicos; como la demanda química de oxígeno total $DQO_{SOLUBLE}$, demanda bioquímica de oxígeno DBO_5 , oxígeno disuelto, sólidos totales, sólidos volátiles totales, sólidos disueltos totales, coliformes fecales, temperatura del ambiente, temperatura en el punto de muestreo, pH, turbiedad, conductividad y humedad relativa.

CAPÍTULO II – ANTECEDENTES

2.1. Antecedentes

En las últimas décadas, han surgido muchas investigaciones relacionadas al tratamiento de aguas residuales mediante humedales artificiales. Tan solo en la FIA-UNI, hasta la fecha existen varias tesis de investigación aprobadas y sustentadas sobre este tema. Por otro lado, no existen muchas investigaciones que traten específicamente sobre remoción de Nitrógeno del agua residual. Es así que, para complementar la idea, tomaremos antecedentes tanto de Perú como de otras universidades extranjeras.

Comenzaremos citando la investigación de Víctor Maldonado (2005), quién investigó el tratamiento de aguas residuales mediante humedales como un sistema de tratamiento que promueve el uso sostenible de recursos hídricos y permite aprovechar los nutrientes de las aguas residuales para el crecimiento de la plantas, este estudio intento demostrar que los humedales pueden ser utilizados sin contaminar el medio ambiente y que es posible obtener beneficios económicos mediante la elaboración de productos con totora, y además es una alternativa de tratamiento de aguas residuales para pequeños sistemas principalmente en zonas rurales, campamentos mineros, lugares donde sistemas convencionales no pueden ser aplicables como es el caso de zonas con napa freática alta, sistemas de tratamiento provisionales, entre otros, con un costo mínimo de operación y mantenimiento. El proyecto se desarrolló por un periodo de 01 año, las máximas eficiencias en remoción de materia orgánica estuvieron en el rango de 93% y 97% para DBO5 y DQO, respectivamente. El caudal afluente al humedal fue 0.25 l/s en promedio, con una DBO5 de 250 mg/l. Aunque la eficiencia de remoción de nitrógeno fue desalentadora, se recomendó evaluar cuál sería la eficiencia de remoción de nitrógeno de un humedal al proporcionarle una pequeña aireación, puesto que se presume que el elemento limitante para que no se produzca la nitrificación es el poco oxígeno disponible en el medio filtrante.

Un segundo estudio, elaborado por Margot Huataquispe y Daniel Segura (2011), evaluó el tratamiento secundario de las aguas residuales de un matadero mediante dos sistemas de humedales de lecho horizontal con aireación artificial y presencia de plantas (LH CP) el cual se comparó con el sistema de lecho horizontal con aireación artificial sin presencia de plantas (LH SP). El desarrollo del proyecto consistió en la construcción de dos unidades de humedales (LH CP) y (LH SP). Se trabajó con un caudal de ingreso de 23.50 ml/min y un tiempo de

retención de 1.73 días para cada lecho. Los resultados indicaron eficiencias de remoción promedio de DQO para el LH SP y LH CP fue de 92.78% y 89.86% respectivamente; en la DQO para el LH CP y LH SP fue de 96.42% y 97.98% respectivamente. Así mismo en cuanto a la eficiencia de remoción promedio de los parámetros sólidos suspendidos y turbidez para la LH SP fue de 90.61%; 93.34% respectivamente y en el LH CP fue de 86.34% y 82.73% respectivamente. En cuanto al parámetro nitrógeno como nitratos, nitritos y nitrógeno amoniacal, permitieron mostrar que la nitrificación en ambos lechos es incompleta debido a la alta carga de nitrógeno que ambos lechos reciben. Se concluyó que mientras mayor es la carga orgánica del afluente, mayor debe ser la aireación suministrada al humedal.

Un tercer estudio desarrollado por Eric Redmond (2012) consistió en mejorar la capacidad de remoción de nitrógeno de un humedal de flujo sub superficial a escala piloto con plantas, aplicando aireación intermitente por ciclos de 6 horas, en un clima frío, usando agua residual doméstica. Este humedal se comparó con tres variantes: un humedal sin plantas y sin aireación, un humedal con plantas y sin aireación, y un humedal sin plantas y con aireación. Se verificó que mediante la aireación se mejoraban las condiciones para que existan los procesos de nitrificación y des-nitrificación. Se encontró que la aireación no solo mejora drásticamente la capacidad del humedal para remover Nitrógeno, sino que también aumenta la eficiencia en remoción de CBOD, COD y fósforo. Se encontró que la eficiencia de remoción de nutrientes y otros parámetros no varía significativamente en los humedales “con” o “sin” plantas, pero si varía significativamente en los humedales “con” y “sin” aireación. En esta tesis se recomienda determinar el periodo óptimo de “aireación” y “no aireación” de un humedal.

Una cuarta investigación desarrollada por Jacinto Ventura (2014), tuvo por objetivo realizar el tratamiento de aguas residuales del efluente proveniente del camal a la salida del DAF mediante humedales artificiales en serie, el primero con aireación mecánica constante y el segundo sin aireación. Para esto se construyó dos humedales de flujo horizontal a escala piloto de los cuales a uno se le acondicionó una aireación constante de un difusor de burbuja fina en el fondo del lecho. En el humedal acondicionado con aireación mecánica se trabajó a un caudal constante de 0.12 m³/d y en el humedal sin aireación se trabajó a un caudal de 0.15 m³/d. Los resultados en la unidad de tratamiento (Humedal aireado + humedal sin aireación) indicaron eficiencias máximas de remoción en DBO₅ y DQO de 98.33% y 95.53%. En nitrógeno total alcanzo una eficiencia de remoción máxima de 88.53%; en fosforo total de 76.36%. Se concluye que los humedales son una alternativa económica y eficaz para el tratamiento de aguas residuales.

Finalmente, un estudio realizado por Cyryll Huamán (2017), tuvo por objetivo comparar dos humedales artificiales, uno de lecho de canto rodado con un humedal con lecho volcánico para la remoción de tres diferentes cargas orgánicas. Si bien es cierto, esta investigación, realizada en las instalaciones de CITRAR, no guarda relación con mi tema de tesis, es importante señalar que el humedal antiguo (H1) de mi investigación, corresponde al humedal con lecho de canto rodado de la tesis de este antecedente, construido en enero del año 2015.

Estos estudios hablan de la relación muy estrecha que existe entre los humedales sub-superficiales y la aireación que estos pueden llegar a tener, ya sea de manera natural mediante sus raíces, o de manera artificial, mediante una bomba de aire, respecto a su capacidad de remover Nitrógeno del agua residual doméstica o industrial.

La diferencia de mi tesis de investigación respecto a los antecedentes mencionados, es que se evaluó cómo varía la capacidad para remover nitrógeno de agua residual doméstica, mediante un humedal horizontal subsuperficial, cuando varía el periodo de aireación que se le suministra, para un clima costero sub-tropical.

2.2. Formulación del Problema

2.2.1 Descripción del Problema

A nivel rural y de pequeñas ciudades, el nitrógeno es un serio problema en el tratamiento de las aguas residuales domésticas por 03 razones principales: 1) Genera contaminación y destrucción de los ecosistemas acuáticos a causa de la eutrofización; 2) Es un parámetro muy difícil y costoso de remover, sobre todo para poblaciones rurales (> 2,000 habitantes) o pequeñas ciudades (> 10,000 habitantes) ya que, las opciones tecnológicas disponibles para tratamiento de nitrógeno tiene un alto costo de inversión inicial, necesita tecnología sofisticada por lo cual necesita mano de obra especializada para su operación, y tiene un costo de mantenimiento muy alto, por lo cual, para una población pequeña, estos sistemas no serían sostenibles en el tiempo; y 3) No existen muchas investigaciones que aborden el problema del nitrógeno en aguas residuales domesticas a nivel rural o de pequeña ciudad.

Si bien es cierto que, anteriores investigaciones se han enfocado en evaluar humedales con aireación mecánica para remover nitrógeno, estas se han enfocado en analizar efluentes industriales, tales como camales y curtiembres, pero no han evaluado sistemas domésticos con poblaciones pequeñas. Asimismo, estas investigaciones nunca tuvieron en cuenta determinar el periodo más conveniente para suministrar aire a los humedales, lo cual implica un

desperdicio de energía. Es así que, en mi investigación se evaluó cómo varía la capacidad para remover nitrógeno de agua residual doméstica, mediante un humedal horizontal subsuperficial, haciendo variar el periodo de aireación que se le suministra, para un clima costero sub-tropical.

2.3. Justificación

Se suele decir que los humedales pueden tener altas eficiencias de remoción de nutrientes como nitrógeno y fósforo. Lamentablemente esta afirmación no es correcta. Si bien es cierto que los humedales tienen potencial para que se formen en él zonas anóxicas, la baja concentración de oxígeno es el principal factor limitante para que no se dé el proceso de nitrificación.

Ahora bien, si el oxígeno no fuera un limitante se produciría el proceso de nitrificación sin problemas, generando como subproducto el nitrato. Sin embargo, esto no implica que se remueva el nitrógeno del agua pues aún estaría faltando el proceso de des-nitrificación. Este proceso requiere, además de un medio anaerobio, que las concentraciones de carga orgánica sean suficientemente altas para que la remoción del nitrógeno no se vea limitada.

En ese sentido, la primera propuesta de esta tesis fue hacer una comparación entre la eficiencia de remoción de nitrógeno en dos humedales artificiales, uno convencional y el otro con aireación intermitente. Si la eficiencia en remoción del humedal con aireación intermitente es lo suficientemente alto como para cumplir la normativa peruana, esta investigación podría generar una alternativa apropiada de tratamiento altamente eficiente en remoción de nitrógeno para el sector rural, teniendo en cuenta que en la actualidad hay una tendencia hacia los tratamientos sostenibles (bajo costo de inversión, operación y mantenimiento), estéticos (por el alto potencial de los humedales para incluirse dentro de los espacios públicos) y ecológicos (por su gran capacidad de generar nuevos ecosistemas).

Por otro lado, hay investigaciones que demuestran que los humedales maduros tienen una mejor capacidad de remover nutrientes que los humedales más jóvenes. Es así que la segunda propuesta de esta tesis fue hacer una comparación entre la eficiencia de remoción de nitrógeno en dos humedales artificiales, uno antiguo (01 año de antigüedad) y el otro nuevo (recién arrancado), de esta manera se podrá estimar cual es el tiempo necesario para que un humedal horizontal sub-superficial sea lo suficientemente maduro como para remover nitrógeno, y si esta remoción es suficiente para cumplir con la normativa peruana vigente.

2.4.Objetivos

2.4.1. Objetivos General

Evaluar la conversión de nitrógeno en humedales artificiales de flujo horizontal sub-superficial, utilizando la macrófita *Typha Spp*, bajo condiciones controlados de aireación y antigüedad.

2.4.2. Objetivos Específicos

- Comparar la eficiencia en la remoción de nitrógeno en un humedal con aireación intermitente respecto a un humedal sin aireación.
- Determinar la duración óptima de un ciclo de aireación y no aireación en el humedal artificial con aireación intermitente, para un desagüe doméstico.
- Comparar la eficiencia en la remoción de nitrógeno en un humedal maduro (01 año de antigüedad) respecto a un humedal Nuevo (recién arrancado).
- Determinar la viabilidad de implementar humedales artificiales con aireación intermitente para remover nitrógeno del agua residual doméstica, en el contexto peruano.

2.5.Hipótesis

La eficiencia de remoción de Nitrógeno del efluente respecto al afluente de un humedal artificial subsuperficial con la planta emergente tal para clima costero sub tropical se verá mejorada: 1) Cuando el humedal es más antiguo, y 2) Cuando se emplea aireación intermitente en el lecho filtrante.

2.6.Variables

Variables Independientes

- La antigüedad del humedal H_1 .
- Los periodos de aireación en el humedal H_3 .
- Las características del agua residual del afluente.

Variables Dependientes

- La eficiencia de remoción de calidad del agua medida como nitrógeno total, amoniacal, nitrito, nitrato, fosforo, dbo, dco, sólidos y coliformes a la salida de los humedales.

Variables Intervinientes

- Las condiciones climatológicas como temperatura ambiente, temperatura del agua, humedad relativa, radiación solar, presión atmosférica.
- Condiciones hidráulicas de diseño: granulometría del medio de soporte, pendiente de los estanques, porosidad, conductividad hidráulica, tiempo de retención hidráulica, la homogeneidad de distribución y recolección del agua tratada en el humedal artificial de lecho volcánico.
- El crecimiento de las macrófitas y el crecimiento de sus raíces.
- El crecimiento de la biopelícula sobre el material de soporte.

CAPÍTULO III – MARCO TEÓRICO

3.1. Humedales artificiales

Los humedales artificiales son sistemas de fitodepuración de aguas residuales. El sistema consiste en el desarrollo de un cultivo de macrófitas enraizadas sobre un lecho de grava a través del cual el agua residual afluyente es depurada progresiva y lentamente (Delgadillo, et al 2010). Los humedales son sistemas pasivos de depuración. En estos realizan una serie de complejas interacciones físicas, químicas y biológicas.

(Delgadillo, et al, 2010) mencionan que los humedales construidos se han utilizado para tratar una amplia gama de aguas residuales tales como:

- Aguas domésticas y urbanas.
- Aguas industriales, incluyendo fabricación de papel, productos químicos y farmacéuticos, cosméticos, alimentación, refinerías y mataderos entre otros.
- Aguas de drenaje de extracciones mineras.
- Aguas de escorrentía superficial agrícola y urbana.

Estos sistemas purifican el agua mediante remoción del material orgánico (DBO_5), oxidando el amonio, reduciendo los nitratos y removiendo fósforo. Los mecanismos son complejos e involucran oxidación bacteriana, filtración, sedimentación y precipitación química (Cooper, et al, 1996).

Los humedales eliminan contaminantes mediante varios procesos que incluyen sedimentación, degradación microbiana, acción de las plantas, absorción, reacciones químicas y volatilización (Stearman, et al, 2003). Reemplazan así el tratamiento secundario inclusive, bajo ciertas condiciones, al terciario y primario de las aguas residuales.

El funcionamiento de los humedales artificiales se fundamenta en tres principios básicos: La actividad bioquímica de microorganismos, el aporte de oxígeno a través de los vegetales durante el día y el apoyo físico de un lecho inerte que sirve como soporte para el enraizamiento de los vegetales, además de servir como material filtrante. En conjunto, estos elementos eliminan materiales disueltos y suspendidos en el agua residual y biodegradan materia orgánica hasta mineralizarla y formar nuevos organismos (Kolb, 1998).

Los humedales tienen tres funciones básicas que les confieren atractivo potencial para el tratamiento de aguas residuales: fijan físicamente los contaminantes en la superficie del suelo y la materia orgánica, utilizan y transforman los elementos por medio de los microorganismos

y logran niveles de tratamiento consistentes con un bajo consumo de energía y poco mantenimiento (Lara, et al, 1999).

La fitodepuración es la depuración de aguas contaminadas por medio de macrófitas en los humedales, ya sean éstos naturales o artificiales. El término macrófitas, dado su uso en el lenguaje científico, abarca a las plantas acuáticas visibles a simple vista, incluye plantas acuáticas vasculares, musgos, algas y helechos (Fernández, et al, 2004). Constituyen “fitosistemas”, porque emplean la energía solar a través de la fotosíntesis.

El humedal trabaja como tratamiento primario cuando se aplica aguas residuales pre-tratadas, es decir, aguas que fueron sometidas a un pretratamiento físico (rejillas y desarenador).

El humedal trabaja como tratamiento secundario, cuando el afluente proviene de un tratamiento primario (tanque séptico, reactor UASB, Imhoff, lagunas anaerobias, u otro método (Delgadillo, et al, 2010)

3.2. Clasificación de los humedales artificiales

La presente clasificación es propuesta por (Delgadillo, et al, 2010)

3.2.1. Según las macrófitas que se empleen

- **Sistemas de tratamiento basados en macrófitas de hojas flotantes:** Se caracteriza porque los órganos reproductores de las macrófitas son flotantes o aéreos. Entre las especies más empleadas se tiene: Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) y la lenteja de agua (*Lemna sp.*).
- **Sistemas de tratamiento basados en macrófitas sumergidas:** se caracteriza por tener helechos, musgos, carófitas y angiospermas en la zona a la que penetra la luz del sol. Los órganos reproductores son aéreos, flotantes o sumergidos.
- **Sistemas de tratamiento basados en macrófitas enraizadas emergentes:** en suelos anegados permanente o temporalmente; en general son plantas perennes, con órganos reproductores aéreos. Según el CRICYT (Centro Regional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas, 2007) podrían ser de dos tipos:
 - a) **De flujo superficial,** si el agua circula en forma superficial por entre los tallos de las macrófitas.

b) **De flujo subsuperficial**, si el agua circula por debajo de la superficie del estrato del humedal.

Se sintetiza la clasificación de los humedales:

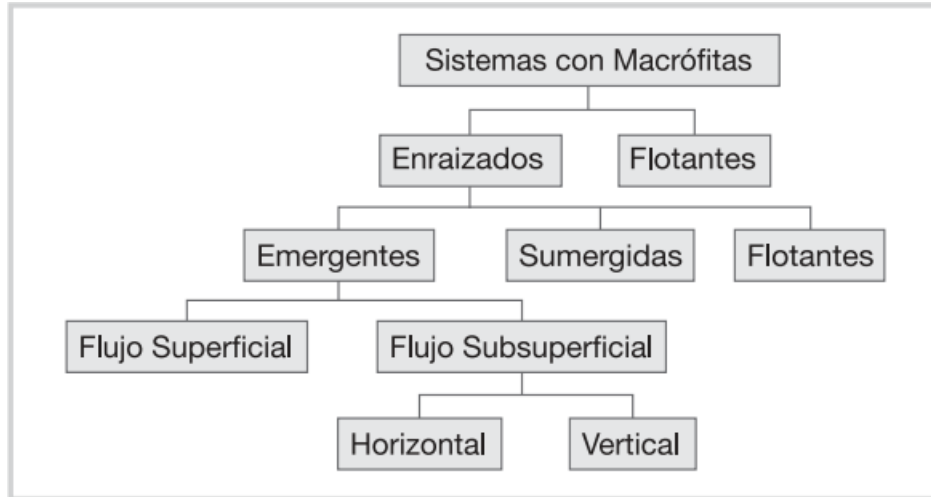


Figura 1. Síntesis clasificación de humedales

Fuente: (Delgadillo, *et al*, 2010)

3.2.2. Humedales artificiales de flujo superficial

Los humedales de flujo superficial son aquellos donde el agua circula preferentemente a través de los tallos de las plantas y está expuesta directamente a la atmósfera.

En términos de paisaje, este sistema es bastante recomendable por su capacidad de albergar distintas especies de peces, anfibios, aves, etcétera. (Delgadillo, *et al*, 2010)

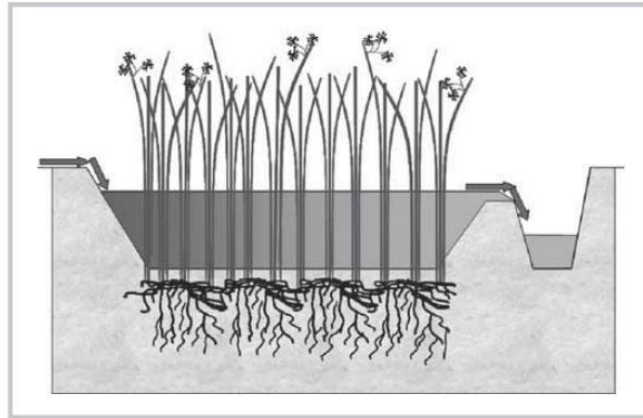


Figura 2. Humedal artificial de flujo superficial

Fuente: (Delgadillo, et al, 2010)

3.2.3. Humedales de flujo subsuperficial

Los sistemas de flujo subsuperficial (conocidos en inglés como subsurface flow constructed humedales), se caracterizan por que la circulación del agua en los mismos se realiza a través de un medio granular (subterráneo), con una profundidad de agua cercana a los 0,6 m. La vegetación se planta en este medio granular y el agua está en contacto con los rizomas y raíces de las plantas. Los humedales de flujo subsuperficial pueden ser de dos tipos: subsuperficial horizontal y subsuperficial vertical. (Delgadillo, et al, 2010).

Humedales subsuperficiales de flujo horizontal

El diseño de estos sistemas por lo general consiste en una cama, ya sea de tierra o arena y grava, plantada con macrófitas acuáticas, en la mayoría de los casos con la caña común o carrizo (*Phragmites australis*). Toda la cama es recubierta por una membrana impermeable para evitar filtraciones en el suelo (Kolb, 1998).

El agua ingresa en forma permanente, el agua es tratada a medida que fluye lateralmente a través de un medio poroso (flujo pistón). La profundidad del lecho varía entre 0,45 m a 1 m y tiene una pendiente de entre 0,5 % a 1 %).

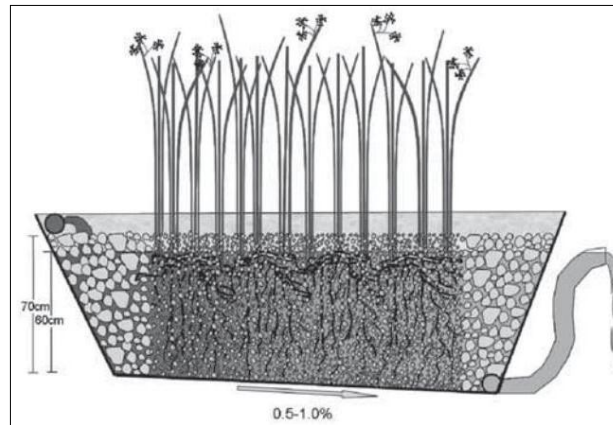


Figura 3. Humedal Subsuperficial de flujo horizontal.

Fuente: (Delgadillo, et al, 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; el sistema de recolección consiste en un tubo de drenaje, rodeado con grava de igual tamaño que la utilizada al inicio, el diámetro de la grava de ingreso y salida oscila entre 50 mm a 100 mm; Es fundamental que el agua residual que ingresa al sistema se mantenga en un nivel inferior a la superficie (5-10 cm), lo cual se logra regulando el nivel del dispositivo de salida en función a este requerimiento (Delgadillo, et al, 2010).

Humedales subsuperficiales de flujo vertical

Los sistemas verticales con flujo subsuperficial son cargados intermitentemente. De esta forma, las condiciones de saturación con agua en la cama matriz son seguidas por períodos de insaturación, estimulando el suministro de oxígeno. Hay muchas posibilidades de variar la distribución de intervalos, la composición de la cama matriz, etcétera, y los resultados que se han obtenido son promisorios. (Kolb, 1998)

También conocidos como filtros intermitentes para preservar y estimular al máximo las condiciones aerobias. La vegetación emergente se planta también en este medio granular; este tipo de humedales reciben las aguas residuales de arriba hacia abajo, a través de un sistema de tuberías de aplicación de agua (ver *Error! No se encuentra el origen de la referencia.*).

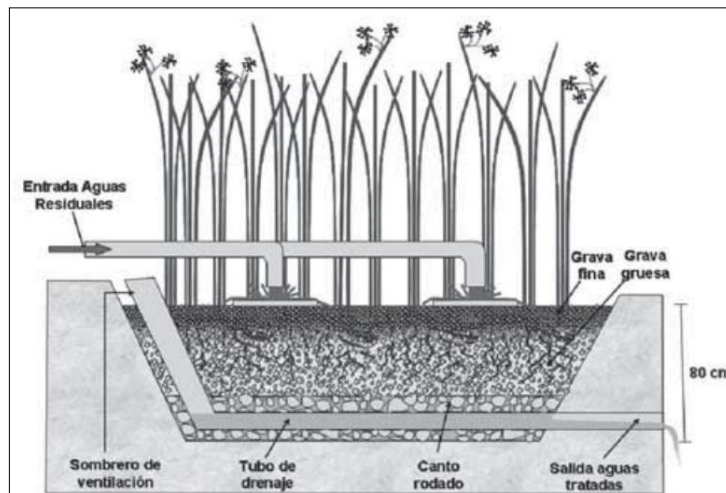


Figura 4. Humedal subsuperficial de flujo vertical.

Fuente: (Delgadillo, et al, 2010)

Adicionalmente, para favorecer las condiciones aerobias del medio poroso, se suele colocar un sistema de aeración con chimeneas, que son tuberías cribadas con salidas al exterior. El sustrato está constituido por varias capas, las más finas en la parte superior, aumentando el diámetro de la grava hacia abajo.

Partes de los humedales de flujo subsuperficial

Básicamente los humedales subsuperficiales tienen cuatro elementos: agua residual, medio de soporte, vegetación y microorganismos.

Agua residual:

Según Rolim (2000), las aguas residuales se clasifican de acuerdo a su procedencia. Estas aguas resultan de la combinación de líquidos y residuos sólidos que provienen de residencias, oficinas, edificios comerciales e instituciones, junto con residuos de industrias, de actividades agrícolas, así como las aguas subterráneas, de precipitación.

Los contaminantes en el agua residual se presentan en la tabla 1:

Tabla 1. Contaminantes importantes de interés en el tratamiento de las aguas residuales.

Contaminantes	Importancia
Sólidos suspendidos	Los sólidos suspendidos pueden llevar al desarrollo de depósitos de lodo y condiciones anaerobias, cuando los residuos no tratados son lanzados al ambiente acuático.
Materia orgánica biodegradable	Compuesta principalmente por proteínas, carbohidratos y grasas. Por lo general, se mide en términos de DBO y DQO. Si es descargada sin tratamiento al ambiente, su estabilización biológica puede llevar al consumo de las fuentes de oxígeno natural y al desarrollo de condiciones sépticas.
Microorganismos patógenos	Los organismos patógenos existentes en las aguas residuales pueden transmitir enfermedades.
Nutrientes	Cuando son lanzados en el ambiente acuático, pueden llevar al crecimiento de vida acuática indeseable. Cuando son aplicados al suelo en cantidades excesivas, pueden contaminar también el agua subterránea.
Compuestos tóxicos	Compuestos orgánicos e inorgánicos seleccionados en función de su crecimiento o sospecha de carcinogenicidad, mutanogenicidad, teratogenicidad o elevada toxicidad. Muchos de esos compuestos se encuentran en las aguas residuales.
Materia orgánica refractaria	Esta materia orgánica tiende a resistir los métodos convencionales de tratamiento de aguas residuales. Ejemplos típicos incluyen detergentes, fenoles y pesticidas agrícolas.
Metales pesados	Los metales pesados son normalmente adicionados mediante actividades humanas. Tienen una alta persistencia en el ambiente, lo que incrementa su posibilidad de acumulación y toxicidad.
Sólidos inorgánicos disueltos	Componentes inorgánicos, como calcio, sodio y sulfato, deben ser removidos si se va a usar nuevamente el agua residual, por ser grandes degradadores del suelo.

Fuente: (Rolim, 2000)

Medio de Soporte:

En los humedales el medio de soporte podría ser: arena, grava, roca, sedimentos y restos de vegetación que se acumulan en el humedal. La principal característica del medio es que debe tener la permeabilidad para permitir el paso del agua a través de él. Esto obliga a utilizar suelos de tipo granular. (Delgadillo, et al, 2010).

La importancia del medio de soporte o sustrato radica en:

- Soporta a muchos de los organismos vivientes en el humedal.
- La permeabilidad del sustrato afecta el movimiento del agua a través del humedal.
- Muchas transformaciones químicas y biológicas (sobre todo microbianas) tienen lugar dentro del sustrato.

- Proporciona almacenamiento para muchos contaminantes.
- La acumulación de restos de vegetación aumenta la cantidad de materia orgánica en el humedal. La materia orgánica da lugar al intercambio de materia, fijación de microorganismos y es una fuente de carbono que es a la vez, la fuente de energía para algunas de las más importantes reacciones biológicas en el humedal (Lara, et al, 1999). El tamaño del medio granular afecta directamente al flujo hidráulico del humedal y por ende en el caudal de agua a tratar. Si el lecho granular está constituido por elevadas cantidades de arcilla y limo, se consigue una mayor capacidad de absorción y una mejor filtración, ya que la adsorción es alta y el diámetro de los huecos es pequeño. Pero también este medio presenta una elevada resistencia hidráulica y requiere velocidades de flujo muy bajas, limitando el caudal a tratar (Arias, 2004).

Vegetación (macrófitas)

Las plantas conocidas como Macrófitas son aquellas que pueden vivir en terrenos inundados toda su vida o durante largos períodos de tiempo encharcadas. También algunos las conocen como plantas palustres y su porte alcanza una cierta importancia, entre las que se tiene los juncos, esparganios, eneas, carrizos, etc.

El papel de la vegetación en los humedales está determinado fundamentalmente por las raíces y rizomas enterrados. Las plantas son organismos foto autótrofos, es decir que recogen energía solar para transformar el carbono inorgánico en carbono orgánico. Tienen la habilidad de transferir oxígeno desde la atmósfera a través de hojas y tallos hasta el medio donde se encuentran las raíces. Este oxígeno crea regiones aerobias donde los microorganismos utilizan el oxígeno disponible para producir diversas reacciones de degradación de materia orgánica y nitrificación. (Arias, 2004)




De acuerdo a (Lara, et al, 1999), las macrófitas contribuyen al tratamiento del agua residual y esorrentía de varias maneras:

- Estabilizan el sustrato y limitan la canalización del flujo.
- Dan lugar a velocidades de agua bajas y permiten que los materiales suspendidos se depositen.

- Toman el carbono, nutrientes y elementos traza y los incorporan a los tejidos de la planta.
- El escape de oxígeno desde las estructuras subsuperficiales de las plantas, oxigena otros espacios dentro del sustrato.
- El tallo y los sistemas de la raíz dan lugar a sitios para la fijación de microorganismos.

Se presenta el resumen de las características de las tres especies más utilizadas en los humedales artificiales.

Tabla 2. Características de las especies vegetales más utilizadas en humedales artificiales

Nombre Científico	Familia	Nombre Común	Características	Distancia de siembra	Penetración de Raíces en Grava
 <p><i>Thypha spp</i></p>	Tifácea	Espadaña, Enea, Junco, Bayón, Bohordo, Maza de Agua.	Ubicua en distribución. Capaz de crecer bajo diversas condiciones. Se propaga fácilmente. Capaz de producir una gran biomasa anual.	60 cm	pequeña (30 cm)
 <p><i>Scirpus spp</i></p>	Ciperácea	Totora	Perennes. Crecen en grupo. Plantas ubicuas. Crecen en aguas costeras, interiores salobres y humedales. Crecen bien en agua desde 5 cm hasta 3 m de profundidad.	30 cm	Grande (60 cm)
 <p><i>Phragmites spp</i></p>	Gramínea	Carrizo	Anuales. Altos. Rizoma perenne extenso. Plantas acuaticas usadas más extensas. Pueden ser mas eficaces en la transferencia de oxigeno porque sus rizomas penetran verticalmente y mas profundo.	60 cm	Mediana (40 cm)

Fuente: (Delgadillo, *et al*, 2010)

Microorganismos

Los microorganismos se encargan de realizar el tratamiento biológico. En la zona superior del humedal, donde predomina el oxígeno liberado por las raíces de las plantas y el oxígeno

proveniente de la atmósfera, se desarrollan colonias de microorganismos aerobios. En el resto del medio de soporte predominan los microorganismos anaerobios. (Arias, 2004).

Los principales microorganismos presentes en la biopelícula son: bacterias, levaduras, hongos y protozoarios. La biomasa microbiana consume gran parte del carbono y muchos nutrientes. La actividad microbiana tiene la función de transformar un gran número de sustancias orgánicas e inorgánicas en sustancias inocuas e insolubles y alterar las condiciones de potencial de reducción y oxidación del sustrato afectando así a la capacidad de proceso del humedal. Asimismo, gracias a la actividad biológica, muchas de las sustancias contaminantes se convierten en gases que son liberados a la atmósfera. (Lara, et al, 1999)

3.3. Mecanismos de remoción de contaminantes en humedales artificiales

En un humedal artificial se desarrollan diferentes mecanismos de remoción de contaminantes del agua residual, se muestran los principales procesos y mecanismos que ocurren en los humedales construidos.

Tabla 3. Mecanismos de remoción en los sistemas de tratamiento basados en macrófitas.

Parámetro evaluado	Mecanismos de remoción
Sólidos suspendidos	- Sedimentación/filtración
DBO	- Degradación microbiana (aeróbica y anaeróbica). - Sedimentación (Acumulación de material orgánica/lodo en la superficie del sedimento)
Nitrógeno Amoniacal	- Amonificación seguida por nitrificación y desnitrificación amoniacal - Captado por la planta
Patógenos	- Sedimentación/filtración - Declinación - Radiación ultravioleta - Excreción de antibióticos por las raíces de las macrófitas

Fuente: (Delgadillo, *et al*, 2010)

3.3.1 Remoción de sólidos suspendidos

Aunque la mayor parte de los sólidos suspendidos y sedimentables son removidos en el tratamiento previo, los humedales filtran y sedimentan los remanentes, complementando esta remoción. En efecto, las raíces de las macrófitas y el sustrato reducen la velocidad del agua, favoreciendo ambos procesos. El tratamiento previo es muy importante para evitar obstrucciones y la rápida colmatación del humedal.

3.3.2 Remoción de materia orgánica

La remoción de materia orgánica tiene lugar principalmente mediante biodegradación aeróbica o anaeróbica. Una pequeña porción también es removida por procesos físicos como la sedimentación y filtración, cuando la materia orgánica es fijada a los sólidos suspendidos. La biodegradación es realizada por los microorganismos, los cuales están adheridos al medio de soporte, en particular a las raíces y a la superficie de los sedimentos. (Kolb, 1998)

Todos los microorganismos involucrados en este proceso de tratamiento requieren una fuente de energía y carbono para la síntesis de nuevas células, como también otros nutrientes y elementos traza. De acuerdo a su fuente de nutrientes, están clasificados como heterótrofos o autótrofos. Los heterótrofos requieren material orgánico como fuente de carbono para la síntesis de nuevos microorganismos, en cambio, los autótrofos no utilizan materia orgánica sino dióxido de carbono como fuente de carbono. (Kolb, 1998)

Ambos grupos usan luz o una reacción química de oxidación-reducción como fuente de energía para todas las síntesis y son llamados fotótrofos y quimiótrofos, respectivamente (Delgadillo, et al, 2010). Dos clases diferentes de biodegradación microbial, la aeróbica o la anaeróbica, tienen lugar en los humedales construidos, dependiendo de la presencia de oxígeno disuelto.

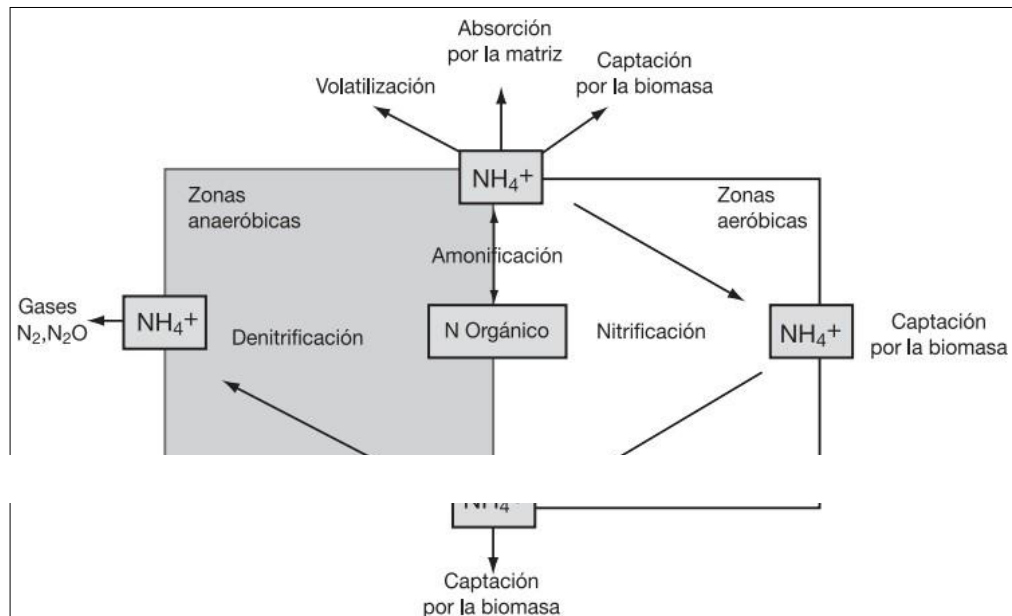
En la degradación aeróbica, dos grupos de microorganismos participan en este proceso de degradación: aeróbicos quimio heterótrofos, oxidando compuestos orgánicos y liberando amonio; y aeróbicos quimioautótrofos, los cuales oxidan el nitrógeno amoniacal a nitrito y nitrato. Sin embargo, debido a la tasa de metabolismo más alta, los heterótrofos son principalmente responsables para la remoción del material orgánico; por lo tanto, la presencia de oxígeno disuelto es un factor limitante. (Delgadillo, et al, 2010)

3.3.3 Remoción de nitrógeno

Según (Delgadillo, et al, 2010) al momento que ingresa agua residual al humedal, la mayor parte del nitrógeno está presente como nitrógeno orgánico, que es fácilmente transformado a amonio. Los principales mecanismos de remoción de nitrógeno en humedales construidos son la nitrificación y la desnitrificación, que ocurren en diferentes zonas del sustrato. Todo el proceso puede ser dividido en pasos, iniciando con la amonificación, seguido por la nitrificación y desnitrificación.

La amonificación ocurre en las zonas aeróbicas, como también en zonas anaeróbicas, por la mineralización del nitrógeno contenido en los orgánicos.

Figura 5. Diagrama del metabolismo del nitrógeno

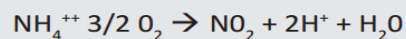


Fuente: (Delgadillo, et al, 2010).

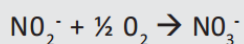
La nitrificación requiere la presencia de oxígeno disuelto (condiciones aeróbicas), amonio o nitrito como fuente de energía y dióxido de carbono como fuente de carbono. La oxidación en sí ocurre en dos estadios, cada uno involucra diferentes especies de bacterias nitrificantes quimioautótrofas.

El primer paso es la oxidación de iones amonio a nitrito (nitrosificación).

Fórmula 1. Nitrosificación



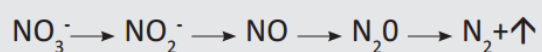
En este paso, la liberación de iones de hidrógeno baja el pH, por lo que es necesario un medio fuertemente alcalino para mantener un pH en el rango de 7.5 a 8.6 (Cooper, et al, 1996). El género bacterial que es considerado para catalizar esta reacción es Nitrosomas, en cambio el género Nitrobacter es responsable para la transformación de nitrito a nitrato.

Fórmula 2. Nitrificación

Toda la reacción necesita un alto ingreso de oxígeno: alrededor de 4.5 kg por cada kg de amonio-nitrógeno (NH_4^{+-}N) oxidado. Las bacterias son sensibles a un amplio rango de inhibidores; así, altas concentraciones de nitrógeno amoniacal son inhibidoras. También concentraciones de oxígeno disuelto por más de 1 mg O_2/l son requeridos y temperaturas por debajo de 100 °C reducen el desempeño significativamente.

La desnitrificación es el paso final en la remoción de nitrógeno. Ocurre bajo condiciones anóxicas, esto significa, que no hay oxígeno disuelto presente (o con una concentración < a 2% de saturación) pero donde el oxígeno está disponible en fuentes tales como el nitrato, nitrito o incluso sulfato.

Un amplio rango de bacterias anaeróbicas facultativas, siendo las más comunes *Pseudomonas* sp., *Achromobacter* sp. y *Aerobacter* sp., realizan el proceso. Toda la reacción que incluye como primer paso la conversión de nitrato a nitrito, seguida por la producción de óxido nítrico y gas nitrógeno, puede ser resumida como sigue:

Fórmula 3. Desnitrificación

Los tres productos son gaseosos, pero mayormente el gas nitrógeno es perdido en la atmósfera debido a que los primeros dos productos son pasajeros en la mayoría de los casos.

Similar al proceso de nitrificación, la desnitrificación es también fuertemente dependiente de la temperatura y es necesario suficiente carbono como fuente de energía para que la bacteria realice la conversión.

3.3.4 Remoción de fósforo

El fósforo está presente en la alcantarilla en tres distintas formas: como ortofosfato, polifosfato y fosfato orgánico. El último es un constituyente menor de la alcantarilla y como las polifosfatos, requieren una posterior descomposición a una forma de ortofosfato más asimilable. Cerca del 25% del fósforo total fijado en la alcantarilla está presente como ortofosfatos tales como:

PO_{4-3} , HPO_{4-2} , H_2PO_4 , H_3PO_4 , que están disponibles para el metabolismo biológico inmediato. Por lo tanto, en términos de utilización, en la planta de tratamiento lo que importa es la concentración de fosfato orgánico antes que la concentración de fósforo total (Kolb, 1998).

La remoción de ortofosfato ocurre principalmente como una consecuencia de la adsorción, complejización y reacciones de precipitación con Al, Fe, Ca y materiales arcillosos en la matriz del sustrato. El consumo de fósforo por la planta puede ser considerado como insignificante comparado con los efectos de adsorción, valores de alrededor del 3% de la carga anual han sido reportados (Kolb, 1998). Dependiendo del valor de pH dentro del sustrato, el fósforo está presente en la forma de sal soluble o minerales insolubles, lo cual significa que el fósforo puede ser transferido dentro de un humedal construido. Debido al contenido de óxidos metálicos en el sustrato, la fijación de fósforo como fosfatos por medio de la adsorción varía (Kolb, 1998).

3.3.5 Remoción de bacterias

La remoción de estos microorganismos está basada en una combinación de factores físicos, químicos y biológicos. Los factores físicos incluyen la filtración, sedimentación, agregación y acción de la radiación ultravioleta. Los mecanismos biológicos incluyen, como se mencionó antes, predación y ataque por bacteriófagos y también la muerte.

Finalmente, los factores químicos son la oxidación, adsorción y la exposición a toxinas fijadas por otros microorganismos y exudadas por las raíces de las plantas (aunque la cantidad de estos antibióticos causa dudas respecto a su efectividad para afectar a los patógenos). (Kolb, 1998) reportó remoción de bacterias (Coliformes fecales) y entero-bacterias en varios humedales en la República Checa, siendo la eficiencia de remoción entre 98% a 99% para estos indicadores bacterianos. En los casos en que se registraron las tasas más bajas, fue debido a tiempos de retención menores.

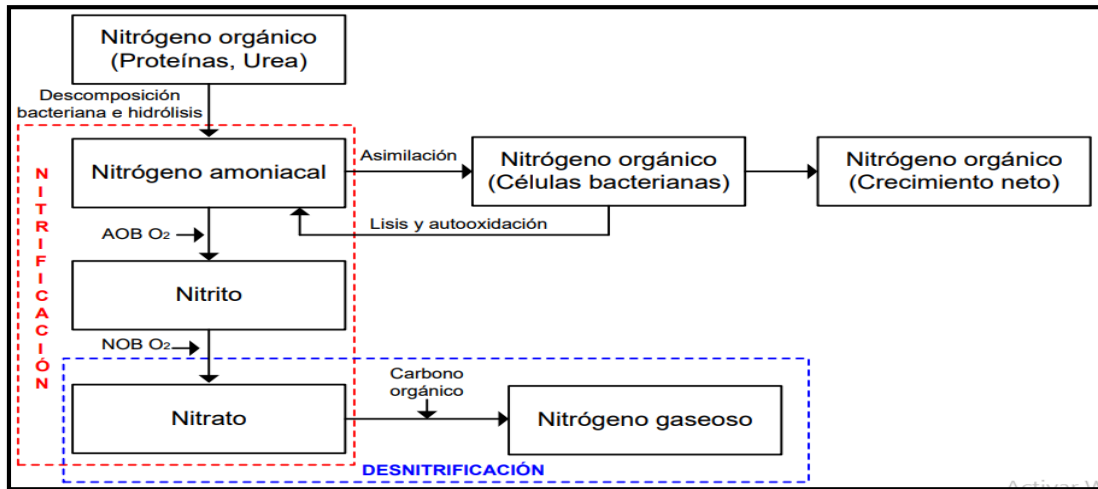
3.4. Eliminación biológica de nitrógeno de las aguas residuales

Existe una variedad de tecnologías de eliminación de nitrógeno de las aguas residuales que implican procesos físicos y químicos tales como el arrastre con aire del amoníaco (stripping de amoníaco), el intercambio iónico y la cloración al breakpoint. Sin embargo, debido su elevado coste, el funcionamiento irregular y los problemas de explotación y mantenimiento, la aplicación de este tipo de tecnologías se ha centrado en situaciones concretas, principalmente sobre efluentes de agua residual de tipo industrial, en donde su baja biodegradabilidad y/o toxicidad hacen inviable el uso de procesos biológicos. También existen tecnologías que fomentan la recuperación del nitrógeno presente en las aguas residuales como es el caso de la precipitación en forma de estruvita ($MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$) Este tipo de tecnología fomenta además la recuperación del fósforo de las aguas residuales, el cual constituye junto al nitrógeno, los principales nutrientes responsables de la eutrofización de ecosistemas acuáticos. Para llevar a cabo el proceso de cristalización de la estruvita se requieren altos valores de pH y ratios equimolares entre amonio, fósforo y magnesio.

3.4.1 Nitrificación y desnitrificación vía nitrato

Las transformaciones del nitrógeno en las aguas residuales a partir de los procesos de nitrificación y desnitrificación vía nitrato. En esta figura se puede observar que el proceso de nitrificación tiene lugar en dos etapas en las que el nitrógeno amoniacal es oxidado a nitrito y posteriormente a nitrato, y que en el proceso de desnitrificación el nitrato es reducido a compuestos nitrogenados gaseosos. Además, se encuentran representados los procesos de hidrólisis del nitrógeno orgánico, y los procesos de asimilación, crecimiento y lisis bacteriana a partir de nitrógeno inorgánico en forma amoniacal.

Figura 6. Transformaciones del Nitrógeno en las aguas residuales



Fuente: (Metcalf & Eddy, 1995)

Nitrificación

El proceso de nitrificación es generalmente realizado por bacterias quimiolitotóxicas que emplean el carbono inorgánico como fuente de carbono para la síntesis celular, y el nitrógeno inorgánico para obtener energía. Los microorganismos involucrados en este proceso se dividen en dos grupos bien diferenciados, las bacterias amonioxidantes (AOB) que se encargan de la conversión del nitrógeno amoniacal a nitrito formando hidroxilamina como producto intermediario, y las bacterias nitritoxidantes (NOB) que se encargan de la transformación del nitrito a nitrato. En las Ecuaciones 1.1 y 1.2 se encuentra representada la estequiometría de las reacciones bioquímicas de oxidación de amonio y oxidación de nitrito, respectivamente. En cada una de estas etapas se produce energía que es utilizada por los microorganismos para el crecimiento y mantenimiento celular.

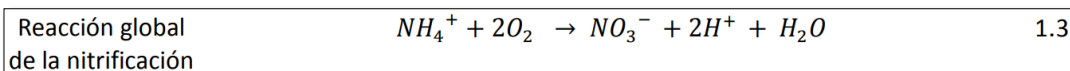
Fórmula 4. Nitrificación etapa 1 y 2

Etapa 1: Organismos AOB	$NH_4^+ + 1.5O_2 \rightarrow NO_2^- + 2H^+ + H_2O$	1.1
Etapa 2: Organismos NOB	$NO_2^- + 0.5O_2 \rightarrow NO_3^-$	1.2

Para las condiciones habituales de operación de una PTAR (tiempos de retención celular inferiores a 25 días y temperaturas del agua en el reactor inferiores a 25°C), la etapa 1 corresponde con la etapa limitante del proceso de nitrificación debido a que el nitrito producido

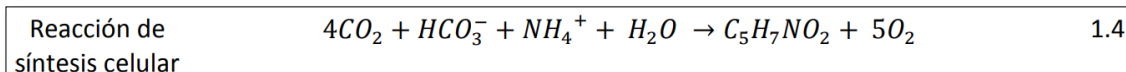
es rápidamente oxidado a nitrato. A temperaturas por debajo de 25°C la velocidad de crecimiento de los organismos NOB es superior a la velocidad de crecimiento de los organismos AOB. La reacción global de oxidación de amonio para ambos grupos de bacterias se encuentra representada en la Ecuación 1.3.

Fórmula 5. Oxidación de amonio



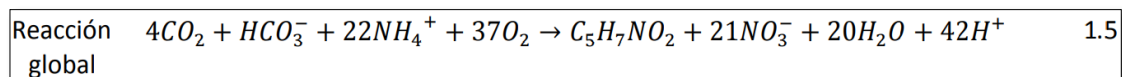
La reacción de síntesis de los microorganismos implicados se encuentra representada en la Ecuación 1.4. En la que se asume como fórmula química de la biomasa $C_5H_7NO_2$. La biomasa asimila una fracción del amonio contenida en el agua residual para la formación de tejido celular.

Fórmula 6. Reacción de síntesis celular



La reacción global que representa los procesos anabólicos y catabólicos de la nitrificación se recoge en la Ecuación 1.5

Fórmula 7. Reacción global de la nitrificación



Los coeficientes estequiométricos de la reacción de nitrificación global muestran que por cada mol de amonio NH_4^+ oxidada el proceso de nitrificación se consume una cantidad significativa de oxígeno, produce una pequeña cantidad de biomasa, y consume una cantidad considerable de alcalinidad debido a la producción de iones hidrógeno (H^+). Esta producción de ácido (H^+) junto con el consumo de dióxido de carbono (CO_2) tiene un impacto sobre el equilibrio del ácido carbónico en disolución acuosa, que se representa en la Ecuación 1.6, por lo que el pH puede variar considerablemente. Esta variación puede afectar al crecimiento de

los microorganismos implicados en el proceso de nitrificación y generar un impacto adverso sobre ecosistemas acuáticos receptores de los efluentes de estas instalaciones de tratamiento.

Desnitrificación

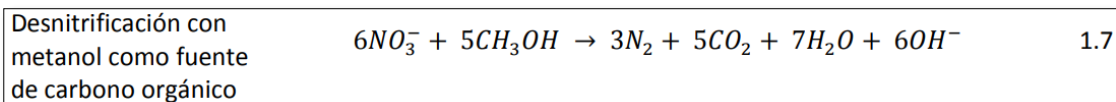
El proceso de desnitrificación consiste en la reducción del nitrato a nitrito y, posteriormente, a compuestos de nitrógeno gaseoso (óxido nítrico NO, óxido nitroso NO₂ y nitrógeno diatómico N₂ en presencia de una fuente de carbono orgánica. El nitrato y el nitrito reemplazan al oxígeno en la cadena de transporte de electrones (respiración microbiana), por lo que la desnitrificación suele producirse en ambientes denominados anóxicos, carentes de oxígeno y con disponibilidad de nitrito y nitrato como aceptores de electrones. Existe una variedad muy alta de microorganismos involucrados en las reacciones de desnitrificación, lo que les proporciona el potencial de ubicuidad en la mayoría de ambientes naturales. Esta abundancia es debida en parte al hecho de que la mayoría de las especies de organismos desnitrificantes son facultativas, con posibilidad de emplear oxígeno o nitrato y nitrito como aceptor final de electrones. La producción energética (ATP) a partir de nitrito y nitrato es menor que la obtenida a partir de oxígeno, y mayor que la obtenida a partir de la reducción de sulfato, situación que determina la preferencia por parte de los microorganismos de emplear un aceptor de electrones u otro (Brock, 1994). Cuando hay oxígeno, los microorganismos tendrán preferencia hacia éste frente al nitrito y nitrato, mientras que en ausencia de oxígeno los microorganismos tendrán preferencia sobre el nitrito y el nitrato antes que sobre el sulfato disponible.

La utilización de los aceptores de electrones está condicionada a los cambios metabólicos ocurridos en la bacteria, generalmente a nivel de síntesis enzimática. En sistemas de cultivo puro se ha encontrado que el oxígeno es responsable de la supresión de la síntesis de enzimas para el proceso de desnitrificación. Sin embargo, ciertas investigaciones han sugerido que incluso en condiciones aerobias o anaerobias las enzimas del proceso de desnitrificación pueden estar presentes en la bacteria (Cervantes, 2009). Las fuentes de carbono orgánico que pueden servir como sustrato para el proceso de desnitrificación de aguas residuales incluyen compuestos orgánicos presentes en las aguas residuales urbanas e industriales, y compuestos adicionados durante la etapa anóxica como metanol (CH₃OH), etanol (C₂H₅OH) y ácido acético (CH₃-COOH), entre otros. La selección de la fuente de carbono orgánico dependerá principalmente de la disponibilidad local y el coste económico. La reacción general de

desnitrificación utilizando metanol como fuente de carbono orgánico se representa en la Ecuación 1.7.

De acuerdo a esta reacción, 1.9 g de (CH₃OH) (2.86 g cuando es expresado como Demanda Química de Oxígeno - DQO) se consumen para reducir 1 g de N – NO₃-

Fórmula 8. Desnitrificación con metanol como fuente de carbono orgánico



El proceso de desnitrificación contribuye a incrementar el pH debido a que la concentración de la alcalinidad se incrementa y la concentración de ácido carbónico disminuye. Cada mg de N-NO₃ - reducido genera 3.57 mg de alcalinidad, expresada como carbonato de calcio (CaCO₃). Por este motivo, en el tratamiento de corrientes de agua residual de baja alcalinidad el proceso de desnitrificación resulta muy atractivo debido a que compensa el descenso del pH ocurrido durante el proceso de nitrificación. (Cervantes, 2009)

3.4.2 Ventajas y desventajas de los humedales artificiales

Para conocer las ventajas y las desventajas que tienen los diferentes tipos de humedales artificiales, se presentan a continuación dos cuadros comparativos. El primero compara humedales artificiales de flujo superficial y subsuperficial, y el segundo compara Humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical y horizontal.

Tabla 4. Comparación entre diferentes sistemas de flujo humedal

	Flujo superficial	Flujo subsuperficial
Tratamiento	Tratamiento de flujos secundarios (aguas ya tratadas por otros medios, ej. Lagunas, biodiscos, fangos activados, etcétera).	Para tratar flujos primarios (aguas pre tratadas ej. Tanques IMHOFF, pozos sépticos).
Operación	Opera con baja carga orgánica	Altas tasas de carga orgánica.
Olor	Puede ser controlado	No existe
Insectos	Control es caro	No existe
Protección térmica	Mala, las bajas temperaturas afectan al proceso de remoción	Buena, por acumulación de restos vegetales y el flujo subterráneo el agua mantiene una temperatura casi constante
Área	Requieren superficies de mayor tamaño	Requieren superficies de menor tamaño
Costo	Menor costo en relación al subsuperficial	Mayor costo debido al material granular que puede llegar a incrementar el precio hasta un 30%
Valor ecosistema	Mayor valor como ecosistemas para la vida salvaje, el agua es accesible a la fauna	Menor valor como ecosistema para la vida, el agua es difícilmente accesible a la fauna.
Usos generales	Son de restauración y creación de nuevos ecosistemas	Tratamiento de aguas residuales, principalmente para casas aisladas y núcleos menores de 200 habitantes.
Operación	Son tratamientos adicionales a los sistemas convencionales (usadas para tratamiento terciario y mejoramiento de calidad agua)	Puede usarse como tratamiento secundario.

Fuente: (Delgadillo, et al, 2010)

Cabe destacar que los sistemas de flujo horizontal tienen mayor riesgo de colapsar en términos de circulación del agua (taponamiento del sustrato), por tanto, requieren que el agua a tratarse tenga menor material en suspensión.

Tabla 5. Comparación entre humedales artificiales de flujo

	HORIZONTAL	VERTICAL
Funcionamiento	Continuo	Discontinuo
Estado oxidación	Más reducido	Más oxidado
Eficiencia	Más superficie	Menos superficie
Carga superficial	4-6 g DBO5/m ² -d	20-40 g DBO5/m ² -d
Nitrificación	Complicada	Se consigue
Operación	Sencilla	Más compleja

Fuente: (Delgadillo, et al, 2010)

3.5. La *Typha Spp* como Planta Fitodepuradora

El Junco es una planta fitodepuradora, perteneciente Familia Tifáca, nombre científico *Thypha Spp*, son plantas de la clase de las monocotiledóneas, acuáticas y perennes y que se caracterizan por no tener tallo, tienen hojas reunidas en la base, las flores en forma de espiga y el fruto carnoso. La altura media es del orden de 0.50 m a más. (Delgadillo, et al, 2010)

3.5.1 Morfología de la *Typha Spp*

Descripción del tallo y raíces de la *Typha Spp*

Tanto las hojas como las raíces tienen una estructura formada por multitud de tubos de pequeña sección unidos lateralmente y compartiendo las paredes de éstos longitudinalmente. Estos tubos son huecos y continuos a lo largo de toda la longitud de la hoja; se hallan cerrados transversalmente a tramos por una membrana del mismo tipo de material que el de la pared del tubo. La distancia entre las membranas que cierran el tubo no suele ser de más de 10 veces el diámetro de éste, la sección transversal de una hoja se parece mucho a la de un panel de abejas. (Delgadillo, et al, 2010).

Cada uno de los tubos que forman la hoja, al terminar en la cubierta de ésta, presenta una gran superficie de contacto con el exterior, si la comparamos con su diámetro estaría del orden de más de 50 veces, en definitiva, la relación sería la misma que la relación entre la longitud de la hoja y su diámetro. Tanto la cubierta exterior de cualquiera de las partes de la planta macrófita, es decir las hojas, rizomas, tallos, raíces, así como las paredes de los tubos que tiene la estructura de la macrófita es una membrana especializada, en dejar pasar solo la molécula de oxígeno de una superficie a otra de las caras de la membrana, en función de la diferencia de la presión de saturación de oxígeno que se tenga entre las caras de ésta.



Figura 7. Corte transversal del tallo de la *Typha Spp*

Fuente: (Delgadillo, et al, 2010)

Profundidad de las raíces

El sentido de paso del flujo del oxígeno es siempre desde la superficie que tiene mayor presión a la de menor presión de oxígeno. La cantidad o caudal de oxígeno que pasa de un lugar al otro varía con arreglo a la diferencia de la presión isostática; esta última depende de la presión física y de la concentración de oxígeno.

Las macrófitas, por tanto, no pueden vivir enraizados a partir de una cierta profundidad, unos 70 cm. dependiendo del grado de eutrofización del terreno, el del agua y de la especie de la planta. La calidad del material que tiene la membrana de las plantas macrófitas no es igual en todas las especies, ya que sólo la transferencia del oxígeno se origina a partir de un cierto valor diferencial de las presiones isostáticas entre las dos caras de la pared de la membrana (Delgadillo, et al, 2010).

La oxigenación de las raíces en los Juncos

La oxigenación del agua se realiza con el oxígeno que se trasiega por las plantas desde sus hojas a las raíces y de éstas al agua. El proceso se inicia, tras el contacto de las hojas con el oxígeno del aire, éste pasa de la superficie de las hojas a los tubos, que están en contacto con ella, en esa zona y de éstos a otros tubos situados a continuación en la dirección descendente, iniciándose de esta manera el descenso del oxígeno de forma continua hasta sus raíces.

Tanto la superficie de los tubos como la de las hojas, está formada por una membrana especializada en dejar pasar, de una cara de la superficie a la otra, solamente el oxígeno que contiene el aire. La estructura de la membrana vegetal que han desarrollado es estable y funciona tanto si las hojas están secas, por parada vegetativa (invierno) o verdes, dado que la transmisión del oxígeno se realiza por la diferencia de presión isostática de oxígeno entre la superficie de las membranas que constituyen las paredes de los tubos y la superficie de las hojas. (En el congreso de depuración del agua celebrado en Sevilla, para los países ribereños del Mediterráneo, se presentó una investigación que confirmaba que los filtros verdes eran igual de efectivos en el invierno como en las otras estaciones del año, por lo que no bajaba el rendimiento del filtro como elemento depurador, pero no se sabía por qué). Este comentario hizo que se estudiara la forma que tenían las plantas, que se empleaban en la depuración por el sistema de filtros macrófitas flotantes y se comprobó que las plantas transfieren el oxígeno por diferencia de presión isostática de oxígeno. Si no fuera así cuando a estas plantas se le secan las hojas morirían, pues las bacterias anaerobias pasarían a su interior y la pudrirían. La extracción de las substancias disueltas en el agua se hace también desde las raíces, por absorber éstas del medio, las substancias para alimentarse (Delgadillo, et al, 2010).

El camino del oxígeno consiste en: el macrofito toma el oxígeno del aire que le rodea (lo podría tomar de otro medio, pero en la naturaleza no se da otras condiciones) siendo las zonas emergidas de las hojas las únicas capaces de transferir oxígeno al interior de los huecos. El oxígeno (el aire tiene 21% de oxígeno) tiende a pasar de la superficie exterior de la hoja al interior de los tubos de ésta. La presión isostática de oxígeno en los huecos es siempre menor que la del aire exterior (en los huecos o tubos sólo se tiene vapor de agua y oxígeno) por tener este último menos concentración de oxígeno. Así pues, el oxígeno que pasa a la hoja en la zona que emerge del agua, empieza a distribuirse y equilibrarse entre todos los tubos colaterales y a lo largo de cada uno de ellos, descendiendo por éstos, hacia las raíces (Delgadillo, et al, 2010).

3.5.2 Los juncos en el tratamiento de aguas residuales

El sistema es altamente eficiente para la depuración de aguas residuales urbanas, tanto si se emplea como tratamiento principal, secundario o como terciario. (Reduce de forma muy eficiente DBO₅, DQO, conductividad, nitrógeno, fósforo, etc.).

Biomasa de los juncos: Es posible cosechar la totalidad de la biomasa para emplearla en diversos usos industriales y energéticos, ya sea como fibra, almidón, combustible, o bien para nutrición animal o para producción de compost; este último caso, el de compostaje se aplica en la Depuradora de Macrofitas del Aeropuerto de Zaragoza.

3.5.3 Eficiencia depuradora de los juncos en los meses de invierno

En los meses de invierno las hojas de las plantas transfieren el oxígeno sin importar que estén secas o verdes, es decir, que la eficiencia en la depuración del agua residual no se ve alterada.

3.5.4 Rendimiento óptimo de las raíces y horas del micrófito

Rendimiento óptimo de las raíces y hojas del macrofito. - Es muy importante conseguir que la zona radicular tenga el máximo posible de la superficie de las raíces en contacto con el agua y que la zona sumergida de hojas y tallos sea la mínima para que aporte el máximo de oxígeno a la zona radicular. Lo ideal es que el macrofito no tenga sumergido en el agua ninguna parte de las hojas o tallos, para que así pueda capturar del aire la cantidad máxima de oxígeno y que el sistema radicular presente al agua su máxima superficie, es decir que no pueda enterrar sus raíces en la tierra, de lo contrario la parte enterrada perdería la capacidad depurativa. (Fernández, et al, 2004).

3.5.5 Manejo de los Juncos en los humedales

En los sistemas menores de 0,8 ha, la vegetación puede trasplantarse de fuentes cercanas u obtenerse de forma comercial. La implantación en los humedales artificiales se efectúa usualmente por división de mata. Es recomendable que las plantas madres procedan de poblaciones naturales de la zona, a fin de asegurar su adaptación al lugar (Fernández, et al , 2004).

Las plantas se desarraigan del sustrato, se fraccionan de modo que cada porción lleve en su parte subterránea rizomas. Se implantan individualmente en el sustrato o fango del humedal en primavera o épocas calurosas, porque el frío puede matarlas (Hazelip, 2004). El tamaño de los rizomas debe ser de 10 cm de largo y tener brotes en el extremo del corte. La raíz debe colocarse a 5 cm por debajo de la superficie del medio. Los tallos de las plantas pueden ser recortados antes del trasplante.

Es importante que las raíces se desarrollen dentro del medio. Las profundidades características a las que las plantas echan raíces van de 18 a 36 cm. Después de la implantación inicial, el nivel de agua debe descender, de manera que las raíces se extiendan hacia el fondo del medio (Fernández, et al , 2004).

La densidad de siembra óptima es cada 0,5 m. En cualquier caso, se debe permitir que la vegetación crezca de 3 a 6 meses antes de que empiecen las aplicaciones regulares de agua residual (Crites & Tchobanoglous, 2000). Individualmente en el sustrato o fango del humedal en primavera o épocas calurosas, porque el frío puede matarlas (Hazelip, 2004). El tamaño de los rizomas debe ser de 10 cm de largo y tener brotes en el extremo del corte. La raíz debe colocarse a 5 cm por debajo de la superficie del medio. Los tallos de las plantas pueden ser recortados antes del trasplante.

3.5.6 Operación

La operación básicamente consiste en la cosecha y el deshierbe y varía según el tipo de humedal. En humedales subsuperficiales de flujo horizontal se debe hacer el deshierbe durante el primer año. Una vez que las plantas están establecidas, esta operación deja de ser necesaria. No se recomienda el segado, porque los restos de vegetales muertos no dificultan el funcionamiento hidráulico del humedal; es más, permiten aislar térmicamente el sustrato, lo que es útil en invierno (Oficina Internacional del Agua, UE, 2001).

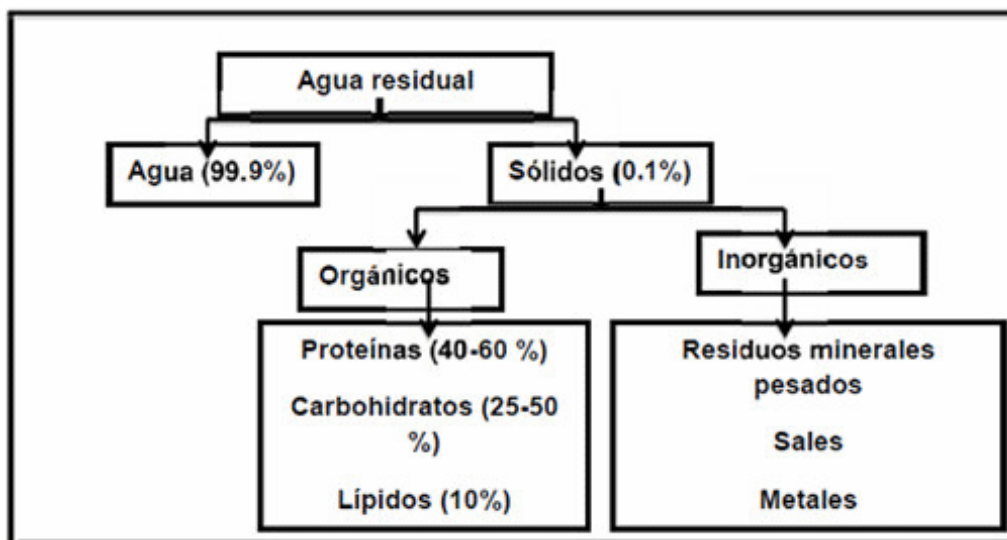
3.5.7 Plagas y enfermedades

(Fernández, et al , 2004) indica que son plantas muy rústicas de las que no se tiene referencias de plagas y enfermedades en su aplicación en humedales artificiales.

3.5.8 Materia Orgánica

La materia orgánica, (MO), representa la parte más importante de la contaminación, aquella que agota el oxígeno disuelto, (OD), en las masas de agua. En agua residual doméstica, (ARD), de composición típica, cerca del 70% de los sólidos suspendidos totales, (SST), son (MO). La materia orgánica está compuesta de Carbono, Hidrógeno, Oxígeno, elementos comunes a todos los compuestos orgánicos, junto con el Nitrógeno en algunos casos. También están presentes a menudo otros compuestos como el fósforo, Azufre, Hierro, etc. La (MO) en las ARD se divide por conveniencia en diferentes grupos como sigue:

Figura 8. Composición del agua residual doméstico



Fuente: (Delgadillo, et al, 2010)

Proteínas: Componen del 40% al 60% de las ARD. Son el principal constituyente de los organismos animales. Las plantas también contienen proteínas en menor medida. Las proteínas son sustancias complejas e inestables, y su química está asociados a los Aminoácidos, que se componen del grupo ácido, $-\text{COOH}$, y el grupo básico, NH_2 . En los Aminoácidos siempre está presente el Nitrógeno en una proporción relativamente constante, 16%. El Peso Molecular de las proteínas es muy alto, de 20000 a 20 millones. La Urea, $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$, y las proteínas son la principal fuente de Nitrógeno de las AR. Cuando están presentes en grandes cantidades, la producción de malos olores es probable.

Carbohidratos: Constituyen del 25% a 50%, de las ARD. Proviene de la materia vegetal principalmente. Están ampliamente distribuidos en la naturaleza e incluyen azúcares, almidones, celulosa y fibra de madera. Los carbohidratos se componen de C, H₂ y O₂. Los azúcares, solubles en agua, se descomponen fácilmente. Los almidones son más estables, pero pueden ser convertidos a azúcares por actividad microbial. Las fibras son insolubles (principalmente por la celulosa) y son muy resistentes a la descomposición en ARD. Sin embargo, en el suelo se descomponen fácilmente gracias a la acción de Hongos en condiciones ácidas.

Aceites y Grasas: este es el tercer componente en importancia en la comida. Las Grasas y Aceites, G&A, son compuestos de alcohol y glicerol. Los glicéridos de los ácidos grasos volátiles, AGV, son los aceites, líquidos a temperaturas ordinarias. Los AG reaccionan con los álcalis (Hidróxido de Sodio) para formar jabones, que también son muy estables. En las ARD, las G&A, provienen de la mantequilla y los aceites vegetales

Surfactantes: son moléculas grandes ligeramente solubles en agua, y que causan espuma. Conocidos como Detergentes, se usan en limpieza. Pueden causar grandes problemas en la aireación de las ARD. Anteriormente los detergentes tenían de composición alquil-benceno-sulfonato, ABS, no biodegradables, pero hoy han sido mayormente cambiados por detergentes lineales, lineal-alkil-sulfonato, LAS, que son biodegradables. (Fernández, et al , 2004)

Carga Orgánica: Es el valor que representa la cantidad de materia orgánica en las aguas residuales y que ejerce un efecto negativo en el cuerpo receptor de agua, generalmente es calculado a partir de la DBO₅. La carga orgánica no es usada usualmente para parámetro de diseño de unidades de tratamiento de aguas residuales debido a que es un valor que solo expresa masa por unidad de tiempo. (Notijenck, 2013)

El exceso de materia orgánica en un cuerpo de agua, ya sea por un volcado industrial o urbano, tiene como efecto el agotamiento del oxígeno disuelto. Este proceso está dado por la metabolización de la materia orgánica externa, por acción de las bacterias, que reduce el nivel de oxígeno con la consecuente pérdida de la vida que se desarrolla naturalmente en ese cuerpo de agua (Notijenck, 2013)

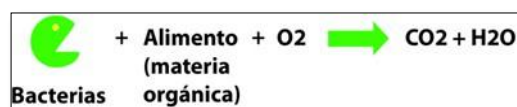


Figura 9.Degradación de Materia Orgánica

Fuente: (Notijenck, 2013)

CAPÍTULO IV – MARCO NORMATIVO

4.1 Lineamiento y Dispositivos Ambientales

a) **Ley Marco de la gestión y prestación de los servicios de saneamiento.**

DL 1280, publicada el 29 de diciembre 2016, es un instrumento normativo que regula la presentación de los servicios de agua potable, alcantarillado sanitario y disposición sanitario de excretas, tanto en el ámbito urbano como rural.

b) **D.S. N° 003-2010-MINAM - Límites Máximos Permisibles para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales.**

La presente norma establece la medida de la concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, que caracterizan a una emisión, que al ser excedida causa o puede causar daños a la salud, al bienestar humano y al ambiente. Su cumplimiento es exigible legalmente por el MINAM y los organismos que conforman el Sistema de Gestión Ambiental.

c) **D. S. N° 004-2017-MINAM - Aprueban Estándares de Calidad Ambiental Para Agua y Establecen Disposiciones Complementarias.**

Artículo 1°.- Aprobar los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua, contenidos en el Anexo I del presente Decreto Supremo, con el objetivo de 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. Los Estándares aprobados son aplicables a los cuerpos de agua del Territorio Nacional en su estado natural y son obligados en el diseño de las normas legales y las políticas públicas siendo un referente obligatorio en el diseño y aplicación de todos los instrumentos de gestión ambiental.

CAPÍTULO V – METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

5.1 Lugar de Evaluación

La presente tesis de investigación se llevó a cabo en las instalaciones de CITRAR, que está ubicado en la ciudad de Lima, en el distrito de Independencia, exactamente en la avenida Tupac Amaru s/n (Puerta N° 07 de la Universidad nacional de Ingeniería). En esta zona, se acondicionó un área donde se construyeron tres humedales a escala piloto. El primero de estos fue de tipo convencional, el segundo de tipo convencional también, pero con un mayor tiempo de funcionamiento (01 año), y el tercero con un sistema de aireación intermitente.

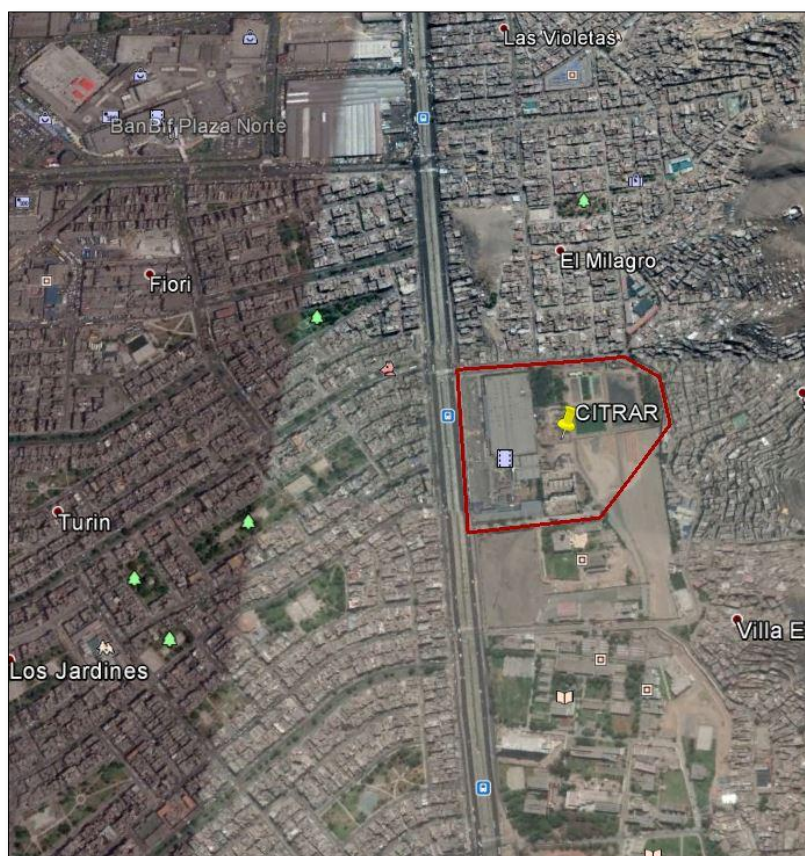


Figura 10. Ubicación del proyecto

Fuente: Google Earth

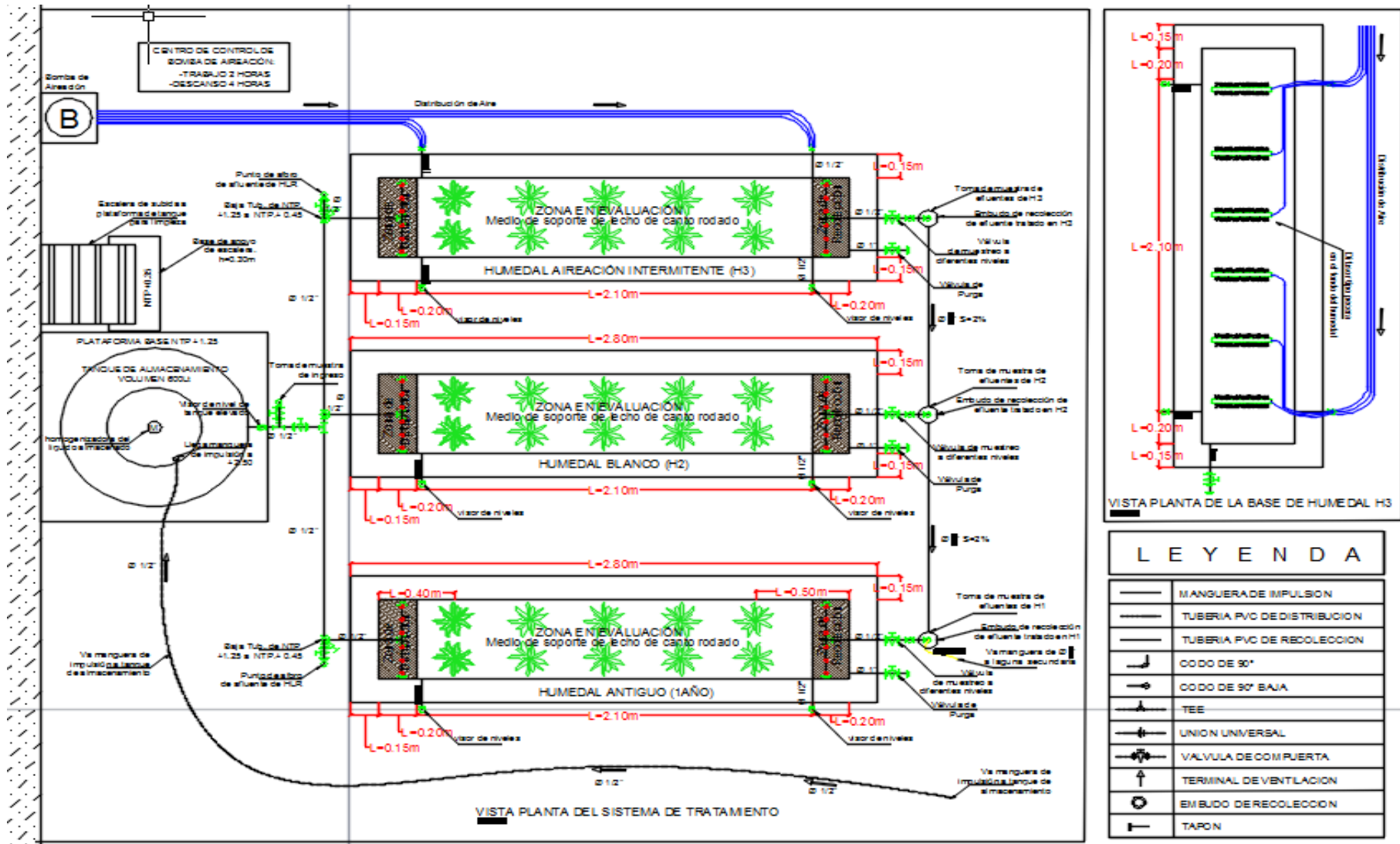


Figura 11. Diagrama de flujo de la investigación

5.2 Diseño y dimensionamiento de los Humedales Piloto

Los humedales se han diseñado en función del parámetro de DBO5, y expresándola en términos de carga orgánica superficial, el valor de diseño es: 14.71 g DBO5/m2/d. El efluente que se pretende obtener deberá cumplir con los LMP en plantas de tratamiento de aguas residuales, se ha tomado un valor más bajo del exigido ya que ser vertidos en cuerpos de agua en la combinación preservara los ECAS de cuerpos de agua destinados al uso agrícola.

Tabla 6. Diseño hidráulico de humedales

DISEÑO HIDRAULICO DE HUMEDALES		
PARAMETROS DE DISEÑO	Valor	Und.
DBO entrada	200.00	mg/l (C ₀)
DBO salida:	35.00	mg/l (C _f)
SST entrada		mg/l
Caudal Q medio (0,000867 lps):	0.075	m ³ /d
Medio:	grava media de 20 mm	
	n=	0.37
	Ks (m ³ /m ₂ *d)	7500
Vegetación:	Totora	
Temperatura aire mes mas frio	11.2	°C
Temperatura agua mes mas frio (T)	18.1386	°C
Helmintos (N° de huevos/L):		N° de huevos/L
Solidos Suspendidos (mg/L):		mg/L
Calculo de la Superficie del Humedal		
Kt = 1.104*1.06 ^(T-20)	0.99	Cte de primer orden dependiente de la Temp.
profundidad media (h)	0.35 m	diametro de grava 3/4" pulg.
Porosidad (e) =	0.37	
Ka = K ⁿ h ^e	0.128 d/m	
Sa = $Q \cdot \ln\left(\frac{C_0}{C_f}\right)$ Ka	1.0179 m ²	Area superficial
Calculo de carga organica superficial (')		
Carga organica superficial = $\frac{Q \cdot C_0}{S_a}$	14.72 g DBO/m ² /d	
Eficiencia de remocion = $\frac{C_0 - C_f}{C_0}$	83%	
Dimensionamiento hidraulico		
K _s =	9000 m ³ /m ² /d	
s (pendiente) =	0.0050% m/m	
As (area transversal) = $\frac{Q}{K_s \cdot s}$	0.17 m ²	
Area de seccion transversal		
prof. Seccion transversal	0.35 m	Relacion: largo/altura 6.11
W=	0.48 m	
Longitud del sistema=	2.14 m	
Por razones constructivas se considera		
Ancho (W) =	0.50 m	
Longitud Humedal (Lt)=	2.10 m	

5.3 Materiales, Reactivos y Equipos

LISTA DE MATERIALES EN LA INSTALACIÓN		Cantidad	Unidades
1	Grava de 1" de diámetro	0.5	m3
2	Graba de 2" de diámetro	0.5	m3
3	Confitillo menudo de recubrimiento	0.5	m3
4	Pintura Impermeabilizante	1	gl
5	Manguera para llenado y evacuación	50	m
6	Losa de concreto	15	m2
7	Válvulas de control	12	Und.
8	Inst. De sistema de Tubería de 1/2" Pulg.	20	m
9	Accesorios: Codos, Tees, Uniones, Tapones	120	Und.
10	Tubería transparente de 1/2" Pulg.	5	m
11	Plástico Negro Resistente	5	m2
12	Electrobomba 1/2 HP	1	Und.
13	Mesclador mecánico con variador de voltaje	1	Und.
14	Cronómetro	1	Und.
15	Equipo aireador con temporizador	1	Und.
LISTA MATERIALES DE LABORATORIO		Cantidad	Unidades
1	Baldes 20 litros	3	Und.
2	Culer para transporte de muestras al laboratorio FIA-UNI	1	Und.
3	Guantes de protección	6	Cajas
4	Mascarilla de protección	4	Cajas
5	Termómetro	1	Und.
6	Probeta de plástico 25 ml	2	Und.
7	botella de 1 lt para toma de muestras	5	Und.
8	Mandil de campo	1	Und.
9	Alcohol de 1L	4	Und.
10	Formato de Registro de ensayos realizados y ocurrencias	1	Und.
11	Materiales e insumos de laboratorio para:		
	Reactivo de Nitrógeno Amoniacal	36	Ensayos
	Reactivo de Nitrógeno Total	36	Ensayos
	Reactivo de Nitrito	36	Ensayos
	Reactivo de Nitrato	36	Ensayos
	Reactivo de DQO	48	Ensayos
	Reactivo de Fosforo total	36	Ensayos
	Reactivo de parámetros físicos	720	Ensayos

5.4 Cronograma de desarrollo

Instalación del Sistema: DEL 02 DE FEBRERO AL 02 DE ABRIL

a) DEL 02 DE FEBRERO AL 02 DE MARZO:

- Construcción de estanque del humedal N° 03 de 2.5 x 0.5 x 0.5 m³ más acabados.
- Construcción de losa aligerada de 3.5 x 3.5 m².
- Instalación de tuberías, válvulas y accesorios para funcionamiento del sistema.
- Instalación de sistema electromecánico de aireación intermitente con timer mas nicho.
- Instalación de sistema electromecánico de mezclador para tanque de equalización con variador de voltaje más nicho.

b) DEL 02 DE MARZO AL 02 DE ABRIL:

- Lavado de 1.50 m³ de piedras canto rodado de playa para lecho de humedales.
- Lavado de 0.50 m³ de confitillo para cubierta anti mosquitos de humedales.
- Impermeabilización y prueba hidráulica de humedales artificiales.
- Traslado y adaptación de 20 plantas junco de agua procedente de los Pantanos de Villa. La adaptación a la nueva agua (desagüe) se logró colocando las raíces de las plantas en agua con 50% de agua potable y 50% desagüe durante la primera semana, y en desagüe al 100% en la segunda semana.
- Instalación de humedales artificiales, incluye:
 - Instalación de difusores de aire en la base de un humedal.
 - Colocación de piedras y confitillo limpios.
 - Trasplante de juncos de agua en los 02 humedales nuevos (el humedal antiguo conservaba sus juncos).

Arranque del sistema: DEL 04 DE ABRIL AL 15 DE MAYO

a) Humedal 01.- Ya había concluido su periodo de puesta en marcha y se encontraba funcionando desde hace 1 año.

- Durante las 04 primeras semanas se midió diariamente los parámetros fisicoquímicos y DQO una vez por semana.
- Durante las 02 últimas semanas, además de lo anterior, se midió Nitrógeno y Fósforo una vez por semana.

b) Humedal 02.- Se hizo pasar desagüe a través del medio filtrante durante 6 semanas hasta que las condiciones se estabilizaron.

- Durante las 04 primeras semanas se midió diariamente los parámetros fisicoquímicos y DQO una vez por semana.
- Durante las 02 últimas semanas, además de lo anterior, se midió Nitrógeno y Fósforo una vez por semana.

c) Humedal 03 (FASE I)

Se hizo pasar desagüe a través del medio durante 6 semanas, incluyéndose al proceso la aireación intermitente. Para esto se programó la bomba de aireación para inyectar aire al sistema, en ciclos de aireación de 6 hrs ON y 6 hrs OFF. El sistema no alcanzó la estabilización debido a que estos ciclos fueron muy largos, lo cual se evidenció en las curvas de OD obtenidas, las cuales nunca se suavizaron.

- Durante las 04 primeras semanas se midió diariamente los parámetros fisicoquímicos y DQO una vez por semana.
- Durante las 02 últimas semanas, además de lo anterior, se midió Nitrógeno, Fósforo y se hicieron curvas de O.D. Vs Tiempo una vez por semana.
- No se obtuvieron buenos resultados en el humedal 03.
- Se decidió probar otro ciclo de aireación de 3 hrs. ON y 3 hrs. OFF para la Fase II.

Etapas Experimentales 1: DEL 17 DE MAYO AL 28 DE OCTUBRE

a) Del 17 de Mayo al 27 de Junio

Humedal 01

Ya había finalizado su tiempo de puesta en marcha.

- Durante las 04 primeras semanas se midió diariamente los parámetros fisicoquímicos y DQO una vez por semana.
- Durante las 02 últimas semanas, además de lo anterior, se midió Nitrógeno y Fósforo una vez por semana.

Humedal 02

Ya había finalizado su tiempo de puesta en marcha.

- Durante las 04 primeras semanas se midió diariamente los parámetros fisicoquímicos y DQO una vez por semana.
- Durante las 02 últimas semanas, además de lo anterior, se midió Nitrógeno y Fósforo una vez por semana.

Humedal 03 (FASE II)

Se programó la bomba de aireación para inyectar aire al sistema, en ciclos de aireación de 3 hrs ON y 3 hrs. OFF. El sistema alcanzó la estabilización entre la cuarta y quinta semana. Las curvas de OD se suavizaron. Sin embargo, los valores de OD durante los periodos de No Aireación (bomba en OFF) aún eran un poco más altos de lo requerido para la desnitrificación.

- Durante las 04 primeras semanas se midió diariamente los parámetros fisicoquímicos y DQO una vez por semana.
- Durante las 02 últimas semanas, además de lo anterior, se midió Nitrógeno, Fósforo y se hicieron curvas de O.D. Vs Tiempo una vez por semana. Se obtuvieron buenos resultados en el humedal 03.
- Se decidió probar un último ciclo de aireación de 2 hrs. ON y 4 hrs. OFF para la Fase III.

b) Del 27 de Junio al 07 de Agosto

Humedal 01

Ya había finalizado su tiempo de puesta en marcha.

- Durante las 04 primeras semanas se midió diariamente los parámetros fisicoquímicos y DQO una vez por semana.
- Durante las 02 últimas semanas, además de lo anterior, se midió Nitrógeno y Fósforo una vez por semana.

Humedal 02

Ya había finalizado su tiempo de puesta en marcha.

- Durante las 04 primeras semanas se midió diariamente los parámetros fisicoquímicos y DQO una vez por semana.
- Durante las 02 últimas semanas, además de lo anterior, se midió Nitrógeno y Fósforo una vez por semana.

Humedal 03

Se programó la bomba de aireación para inyectar aire al sistema, en ciclos de aireación de 2 hrs ON y 4 hrs. OFF. El sistema alcanzó la estabilización entre la cuarta y quinta semana. Las curvas de OD no solo se suavizaron, sino que también comenzaron a dar valores dentro de los rangos esperados, necesarios para el proceso de nitrificación y desnitrificación.

- Durante las 04 primeras semanas se midió diariamente los parámetros fisicoquímicos y DQO una vez por semana.
- Durante las 02 últimas semanas, además de lo anterior, se midió Nitrógeno, Fósforo y se hicieron curvas de O.D. Vs Tiempo una vez por semana. Se obtuvieron los mejores resultados en remoción en el humedal 03.
- Se decidió mantener este ciclo de aireación durante el resto del proyecto.

c) Del 08 de Agosto AL 28 de Octubre**Humedal 01**

Ya había finalizado su tiempo de puesta en marcha.

- Se midió diariamente los parámetros fisicoquímicos.
- Se midió DQO, Nitrógeno y Fósforo una vez por semana.

Humedal 02

Ya había finalizado su tiempo de puesta en marcha.

- Se midió diariamente los parámetros fisicoquímicos.
- Se midió DQO, Nitrógeno y Fósforo una vez por semana.

Humedal 03

Ya había finalizado su tiempo de puesta en marcha.

- Se midió diariamente los parámetros fisicoquímicos.
- Se midió DQO, Nitrógeno y Fósforo una vez por semana.

ACTIVIDADES ADICIONALES:

- Se limpió el tanque de equalizador 2 veces por semana para resultados más reales.
- Se podaron los Juncos dos veces al mes, para que no se caigan por su propio peso.

- Se midió OD cada 20 min durante un ciclo de aireación y un ciclo de no aireación completos en tres puntos diferentes a lo largo de los humedales. Esto se realizó dos veces al mes. De esta manera se obtuvieron las curvas de OD Vs. Tiempo, que fue crucial en la elección del mejor tiempo de aireación y no aireación.

5.5 Frecuencia del Monitoreo.

Tabla 7.Frecuencia del monitoreo

TÍTULO DEL PROYECTO: "EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE NITRÓGENO Y FÓSFORO DE AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA MEDIANTE AIREACIÓN Y RECIRCULACIÓN DEL EFLUENTE DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL SUBSUPERFICIAL DE FLUJO HORIZONTAL".						
FRECUENCIA DE MONITOREO		PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS (F-Q)				O.D.
DIARIA		pH	T (°C)	Turbidez	Conductividad	
DIA 1	10:00 hr.	x	x	x	x	x
	15:00 hr.	x	x	x	x	x
DIA 2	10:00 hr.	x	x	x	x	x
	15:00 hr.	x	x	x	x	x
DIA 3	10:00 hr.	x	x	x	x	x
	15:00 hr.	x	x	x	x	x
DIA 4	10:00 hr.	x	x	x	x	x
	15:00 hr.	x	x	x	x	x
DIA 5	10:00 hr.	x	x	x	x	x
	15:00 hr.	x	x	x	x	x
FRECUENCIA DE MONITOREO SEMANAL		F-Q	Curvas O.D.	DQO	Nitrógeno	Fósforo
SEMANA 1	1 vez/sem.		x	x	x	x
	diario	x				
SEMANA 2	1 vez		x	x	x	x
	diario	x				
SEMANA 3	1 vez		x	x	x	x
	diario	x				
SEMANA 4	1 vez		x	x	x	x
	diario	x				
FRECUENCIA DE MONITOREO MENSUAL		F-Q	O.D.	DQO	Nitrógeno	Fósforo
ARR 1	N° veces:	60	60	6	2	2
ARR 2	N° veces:	60	60	6	2	2
ARR 3	N° veces:	60	60	6	2	2
Fase Exp	N° veces:	120	120	12	12	12
TOTAL		300	300	30	18	18

5.6 Métodos y Equipos de Laboratorio.

A continuación, se muestran los parámetros de calidad de agua residual medidos en el laboratorio de CITRAR. Se indica la metodología y el equipo de laboratorio empleado.

Tabla 8. Métodos y equipos utilizados en la medición.

Parámetro	Unidad	Metodología	Equipo
Nitrógeno Total	mg/l	Digestión de persulfato	Colorímetro (HACH - DR 890)
Nitrógeno Amoniacal	mg/l	Salicilato	Colorímetro (HACH - DR 890)
Nitritos	mg/l	Metodo del sulfato ferroso	Colorímetro (HACH - DR 890)
Nitratos	mg/l	Reducción de cadmio	Colorímetro (HACH - DR 890)
Fósforo Total	mg/l	Método del Molibdovanadato	Colorímetro (HACH - DR 890)
DQO	mg/l	Digestión por reactor	Colorímetro (HACH - DR 890)
Oxígeno Disuelto	mg/l	Electrométrico	Multimedidor (HACH - HQ40D)
pH	mg/l	Electrodo cristal	pHmetro (HACH - HQ11D)
Temperatura	°C	Electrodo cristal	Multimedidor (HACH - HQ40D)
Conductividad	uS/m	Electrodo cristal	pHmetro (HACH - HQ11D)
Turbiedad	UNT	Nefelométrico	Turbidímetro (HACH - 2100Q)

CAPÍTULO VI – RESULTADOS

6.1 Análisis de la remoción de Humedad Relativa

Tabla 9. Medición de Humedad Relativa por Semanas

TIEMPO		H. R.
PERIODO	SEMANA	AMBIENTE
ARR 01	5	60,8 %
ARR 01	6	56,9 %
ARR 01	7	63,7 %
ARR 01	8	62,6 %
ARR 01	9	62,9 %
ARR 01	10	62,8 %
ARR 02	11	63,3 %
ARR 02	12	64,8 %
ARR 02	13	66,6 %
ARR 02	14	67,6 %
ARR 02	15	65,5 %
ARR 02	16	74,9 %
ARR 03	17	69,6 %
ARR 03	18	63,8 %
ARR 03	19	60,4 %
ARR 03	20	58,0 %
ARR 03	21	61,3 %
ARR 03	22	63,0 %
Fase Exp	23	79,3 %
Fase Exp	24	77,5 %
Fase Exp	25	74,5 %
Fase Exp	26	83,3 %
Fase Exp	27	77,1 %
Fase Exp	28	77,2 %
Fase Exp	29	73,3 %
Fase Exp	30	72,6 %
Fase Exp	31	73,8 %
Fase Exp	32	62,3 %
Fase Exp	33	72,8 %
Fase Exp	34	69,5 %

Tabla 10. Cuadro Resumen HR (%) semanal

Durante	Periodo	Máximo	Mínimo	Promedio
		Afluyente	Afluyente	Afluyente
ARR 01	6 sem	63,7 %	56,9 %	61,6 %
ARR 02	6 sem	74,9 %	63,3 %	67,1 %
ARR 03	6 sem	69,6 %	58,0 %	62,7 %
Fase Exp	12 sem	83,3 %	62,3 %	74,4 %

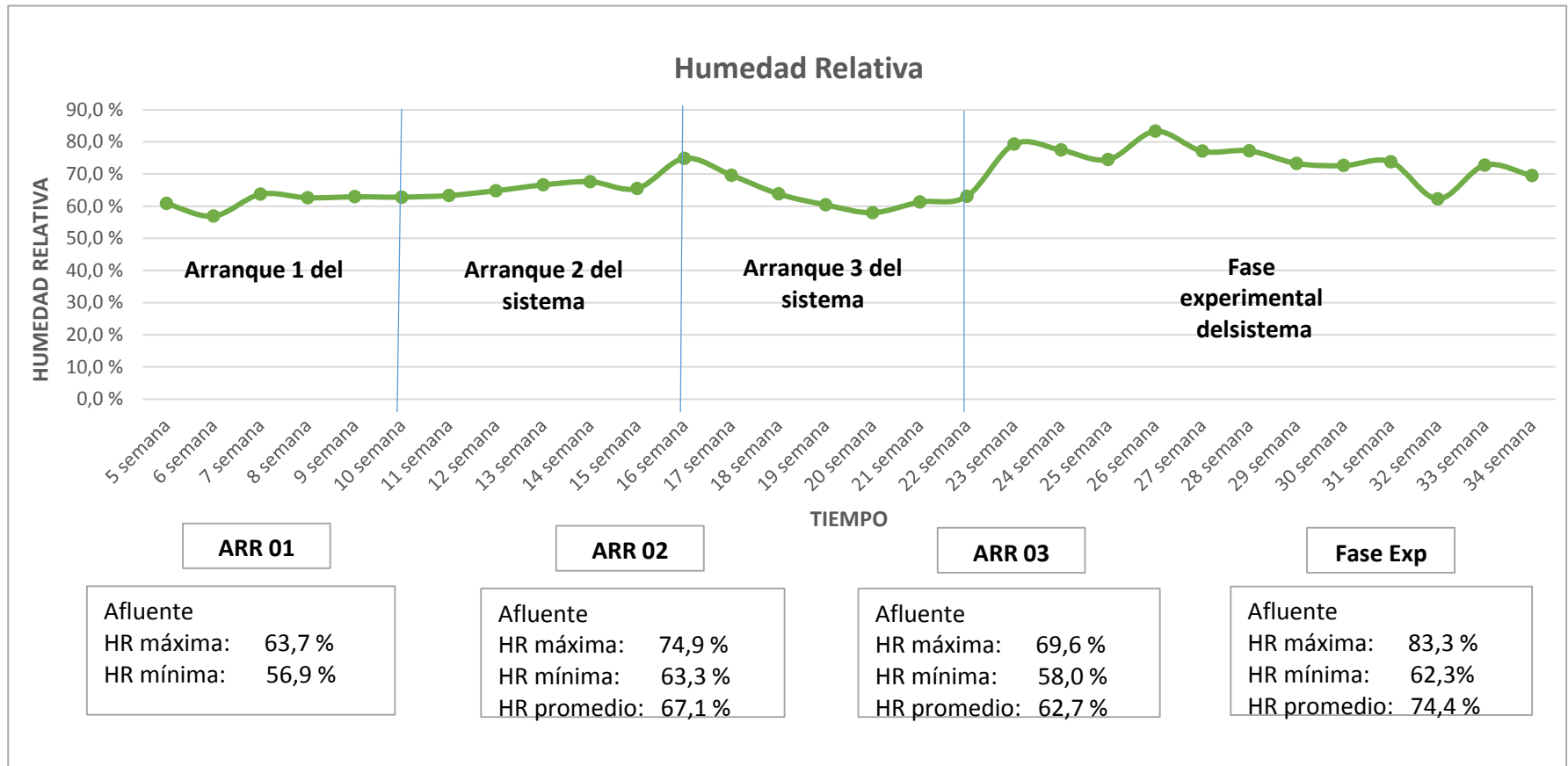


Figura 12. Gráfico de líneas de la Variación de la humedad Relativa Vs. Tiempo

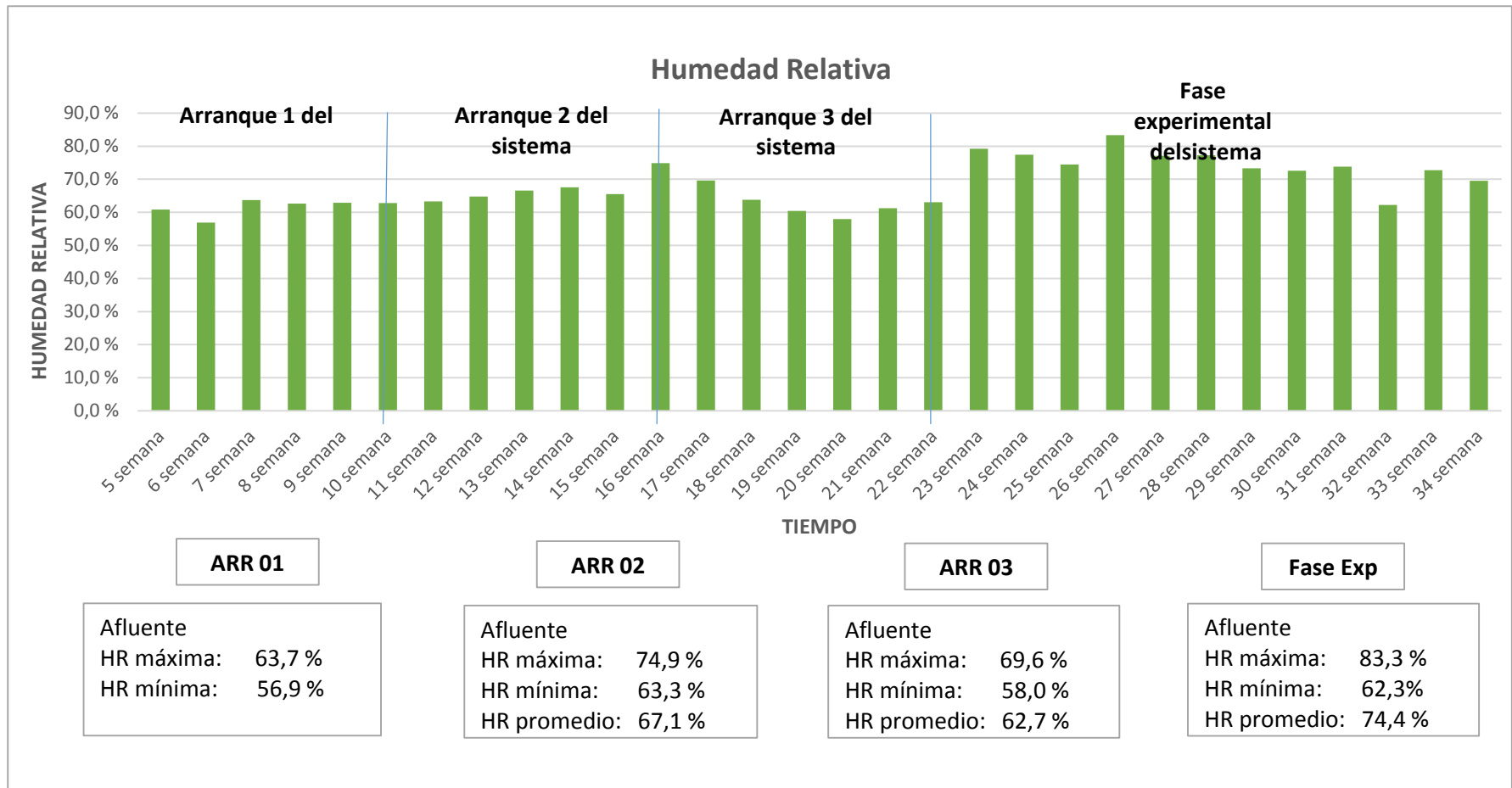


Figura 13. Gráfico de Barras de la Variación de la Humedad Relativa Vs. Tiempo

6.2 Análisis de la remoción de Nitrógeno Total

Tabla 11.Eficiencia de Remoción Nitrógeno Total

TIEMPO		NITRÓGENO TOTAL (mg/l)				EFICIENCIA		
PERIODO	SEMANA	AFLUENTE	EFLUENTE (H ₁)	EFLUENTE (H ₂)	EFLUENTE (H ₃)	H ₁	H ₂	H ₃
ARR 01	9	66	54	61	49	18,2%	7,6%	25,8%
ARR 01	10	59	47	55	45	20,3%	6,8%	23,7%
ARR 02	15	71	59	64	45	16,9%	9,9%	36,6%
ARR 02	16	78	64	71	50	17,9%	9,0%	35,9%
ARR 03	21	62	57	56	34	8,1%	9,7%	45,2%
ARR 03	22	58	53	50	31	8,6%	13,8%	46,6%
Fase Exp	23	49	44	44	27	10,2%	10,2%	44,9%
Fase Exp	24	58	51	49	30	12,1%	15,5%	48,3%
Fase Exp	25	38	34	33	32	10,5%	13,2%	15,8%
Fase Exp	26	56	51	48	31	8,9%	14,3%	44,6%
Fase Exp	27	43	38	36	24	11,6%	16,3%	44,2%
Fase Exp	28	52	47	45	30	9,6%	13,5%	42,3%
Fase Exp	29	40	36	32	22	10,0%	20,0%	45,0%
Fase Exp	30	44	39	36	25	11,4%	18,2%	43,2%
Fase Exp	31	11	8	4	2	27,3%	63,6%	81,8%
Fase Exp	32	23	19	19	11	17,4%	17,4%	52,2%
Fase Exp	33	61	54	51	30	11,5%	16,4%	50,8%
Fase Exp	34	56	47	46	28	16,1%	17,9%	50,0%

Tabla 12. Resumen Nitrógeno Total semanal

Durante	Periodo	Máximo				Mínimo				Promedio			
		Afluente	Efluente (H ₁)	Efluente (H ₂)	Efluente (H ₃)	Afluente	Efluente (H ₁)	Efluente (H ₂)	Efluente (H ₃ (3))	Afluente	Efluente (H1)	Efluente (H2)	Efluente (H3)
ARR 01	6 sem	66	54	61	49	59	47	55	45	63	51	58	47
ARR 02	6 sem	78	64	71	50	71	59	64	45	75	62	68	48
ARR 03	6 sem	62	57	56	34	58	53	50	31	60	55	53	33
Fase Exp	12 sem	61	54	51	32	11	8	4	2	44	39	37	24

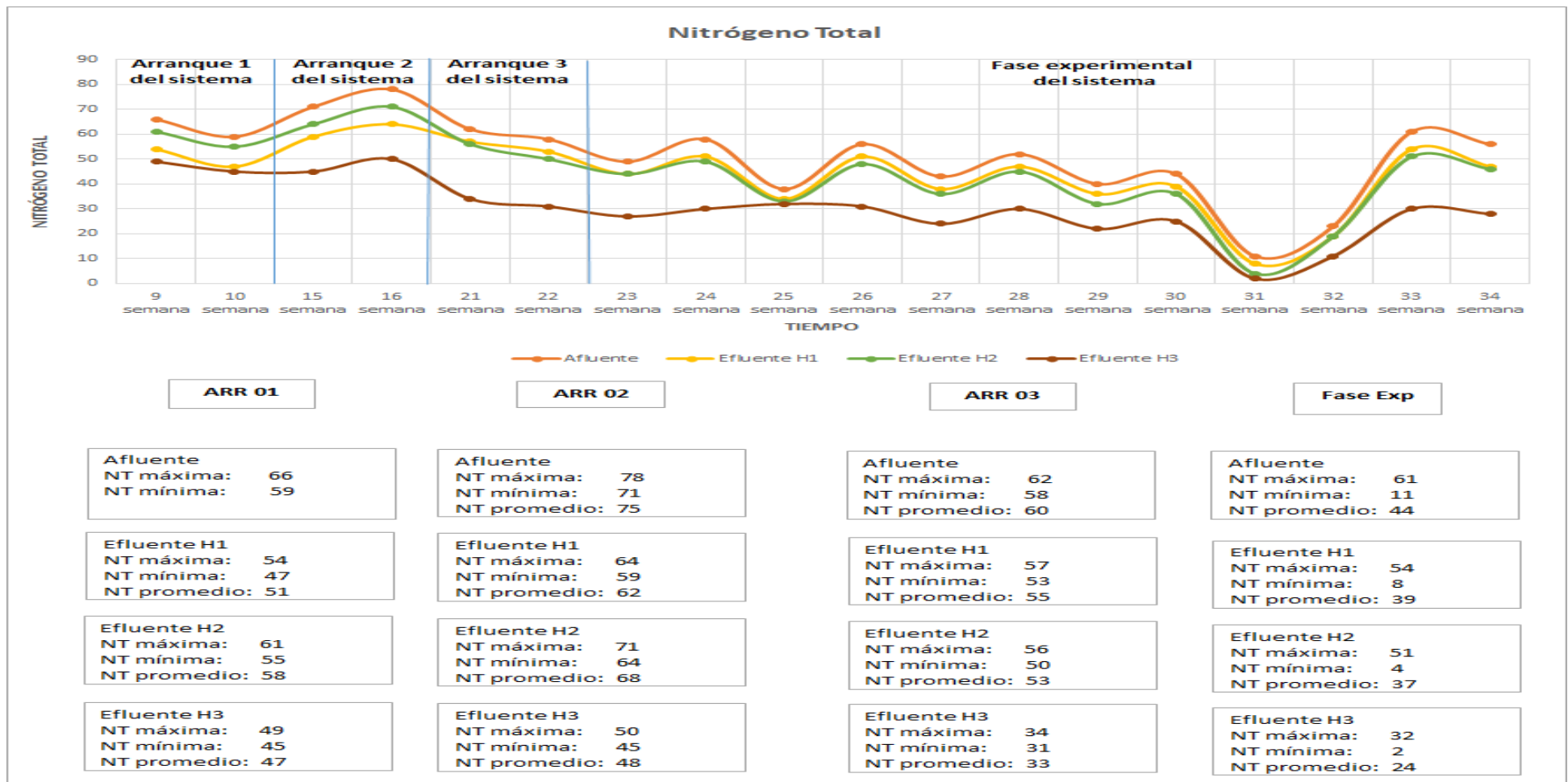


Figura 14. Gráfico de Líneas de la Remoción de Nitrógeno Total Vs. Tiempo

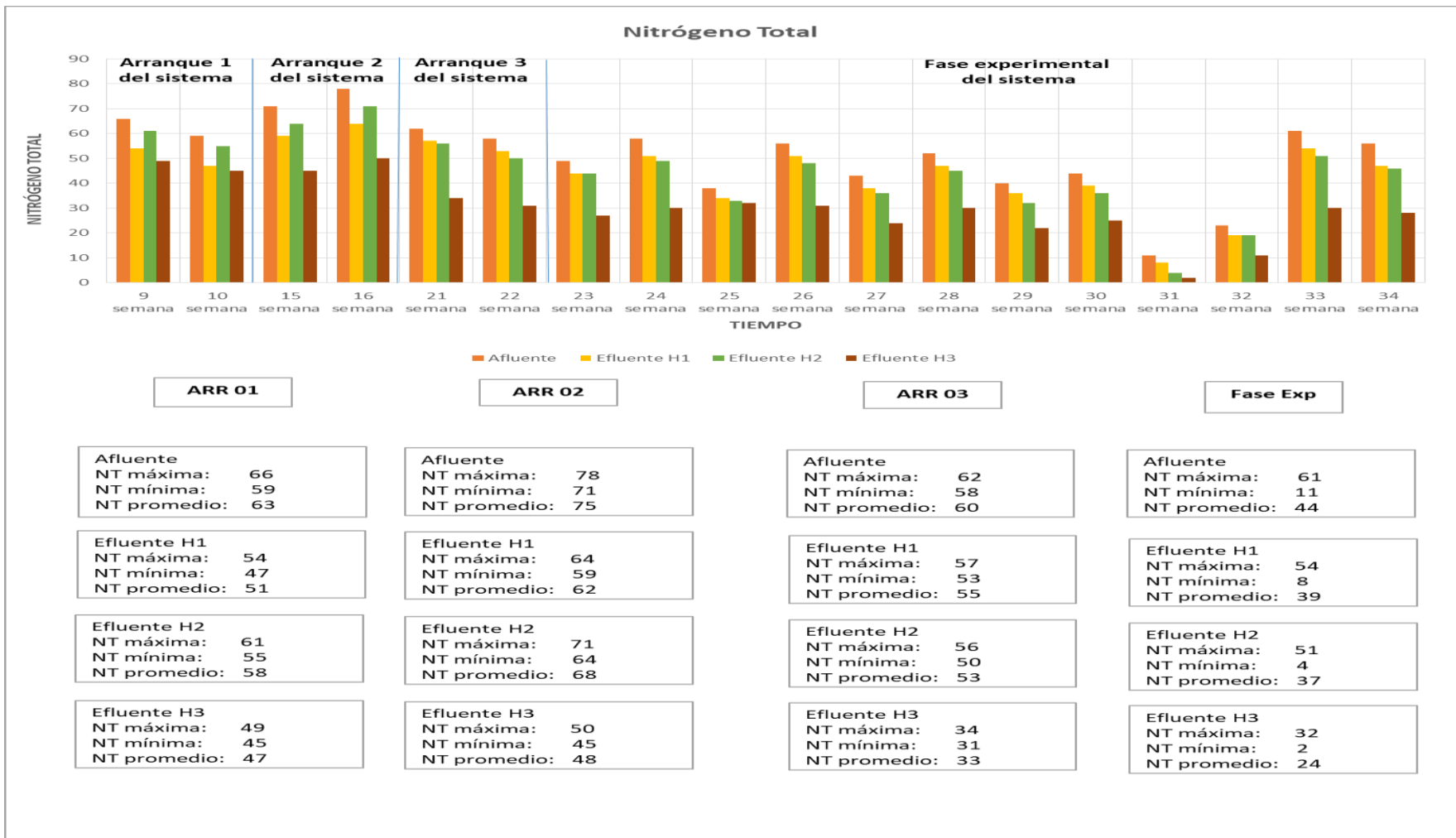


Figura 15. Gráfico de Barras de la Remoción de Nitrógeno Total Vs. Tiempo

Como se observa en la Figura 14, el humedal 3 (aireación intermitente) es quien presenta la mejor eficiencia de remoción de nitrógeno total. Se puede observar que la remoción es mayor cuando hay altas concentraciones a la entrada. Por otro lado, también se puede observar que cuando hay bajas concentraciones de nitrógeno en la entrada, la eficiencia de remoción de nitrógeno de los humedales 1 y 2 es casi tan buena como la que presenta el humedal 3. De esto se puede afirmar que es conveniente usar la aireación intermitente para aguas con altas concentraciones de nitrógeno total. Otro aspecto a resaltar es que inicialmente el humedal 1 (antiguo) logró superar en eficiencia al humedal 2 (nuevo) hasta la semana 18. Por tal motivo se cree que un humedal antiguo remueve más nitrógeno que uno nuevo.

Después de la semana 16, el humedal antiguo se podó mucho y perdió sus plantas. Sus raíces murieron y dejaron de oxigenar, lo cual originó un descenso brusco de la eficiencia del humedal, talvez debido a la caída de OD que suministraban las raíces, o quizás debido a que se removieron una parte importante de bacterias especializadas en remoción de nitrógeno al remover las raíces.

6.3 Análisis de la remoción del Nitrógeno Amoniacal

Tabla 13.Eficiencia de Remoción del Nitrógeno Amoniacal

TIEMPO		NITRÓGENO AMONIAICAL (mg/l)				EFICIENCIA		
PERIODO	SEMANA	AFLUENTE	EFLUENTE (H ₁)	EFLUENTE (H ₂)	EFLUENTE (H ₃)	H ₁	H ₂	H ₃
ARR 01	9	55	46	55	9	16,4%	0,0%	83,6%
ARR 01	10	54	48	51	6	11,1%	5,6%	88,9%
ARR 02	15	54	46	53	7	14,8%	1,9%	87,0%
ARR 02	16	53	49	51	5	7,5%	3,8%	90,6%
ARR 03	21	55	55	52	2	0,0%	5,5%	96,4%
ARR 03	22	55	55	52	0	0,0%	5,5%	100,0%
Fase Exp	23	43	42	38	7	2,3%	11,6%	83,7%
Fase Exp	24	52	52	47	6	0,0%	9,6%	88,5%
Fase Exp	25	33	32	27	0	3,0%	18,2%	100,0%
Fase Exp	26	50	48	44	19	4,0%	12,0%	62,0%
Fase Exp	27	27	24	20	2	11,1%	25,9%	92,6%
Fase Exp	28	44	42	44	1	4,5%	0,0%	97,7%
Fase Exp	29	32	28	24	1	12,5%	25,0%	96,9%
Fase Exp	30	39	35	31	2	10,3%	20,5%	94,9%
Fase Exp	31	9	6	4	0	33,3%	55,6%	100,0%
Fase Exp	32	20	17	14	1	15,0%	30,0%	95,0%
Fase Exp	33	54	50	49	6	7,4%	9,3%	88,9%
Fase Exp	34	51	47	45	4	7,8%	11,8%	92,2%

Tabla 14. Cuadro resumen Nitrógeno Amoniacal semanal

Durante	Periodo	Máximo				Mínimo				Promedio			
		Afluente	Efluente (H ₁)	Efluente (H ₂)	Efluente (H ₃)	Afluente	Efluente (H ₁)	Efluente (H ₂)	Efluente (H ₃)	Afluente	Efluente (H ₁)	Efluent(H ₂)	Efluente (H ₃)
ARR 01	6 sem	55	48	55	9	54	46	51	6	55	47	53	8
ARR 02	6 sem	54	49	53	7	53	46	51	5	54	48	52	6
ARR 03	6 sem	55	55	52	2	55	55	52	0	55	55	52	1
Fase Exp	12 sem	54	52	49	19	9	6	4	0	38	35	32	4

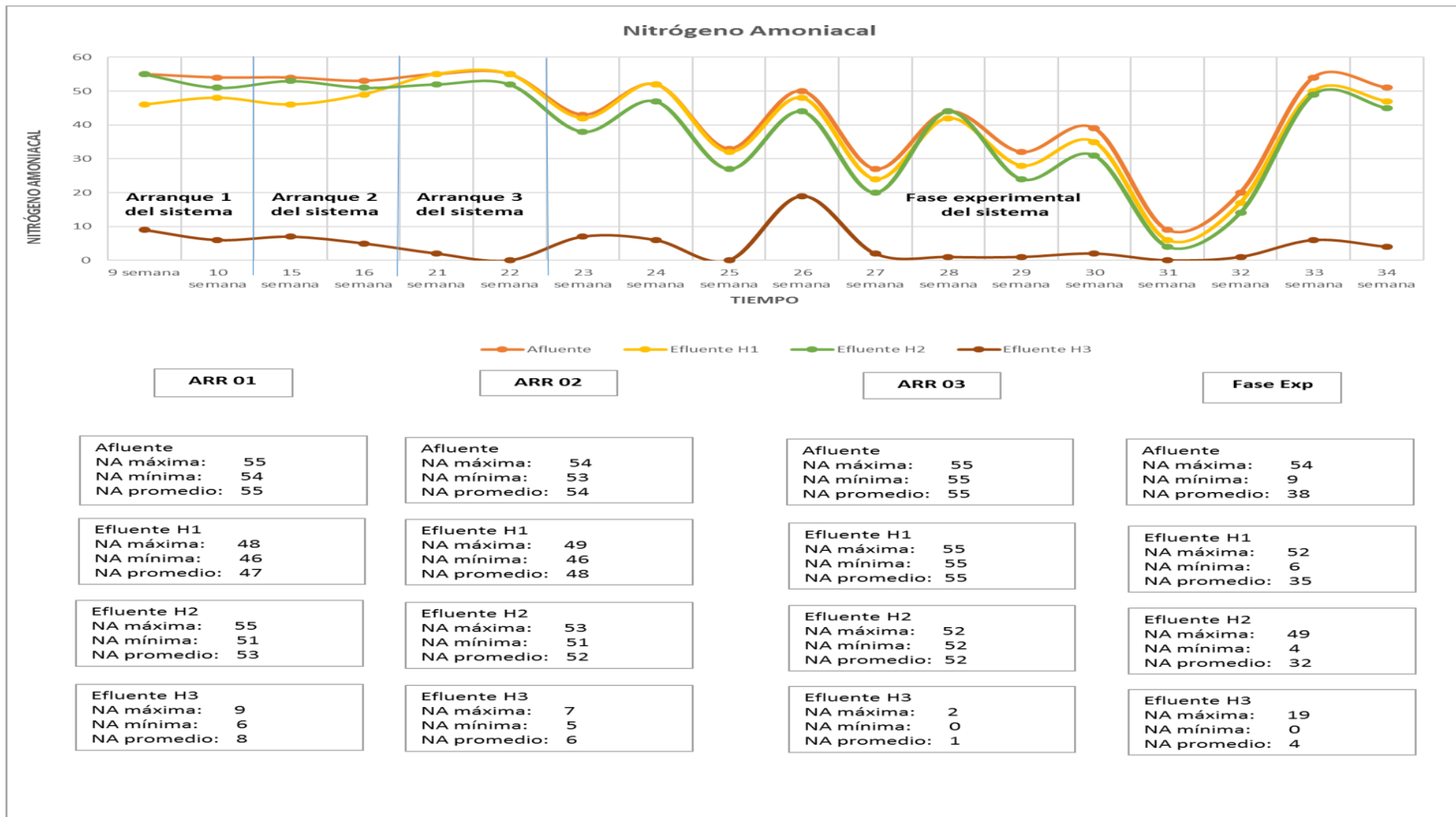


Figura 16. Gráfico de Líneas de la Remoción de Nitrógeno Amoniacoal Vs. Tiempo

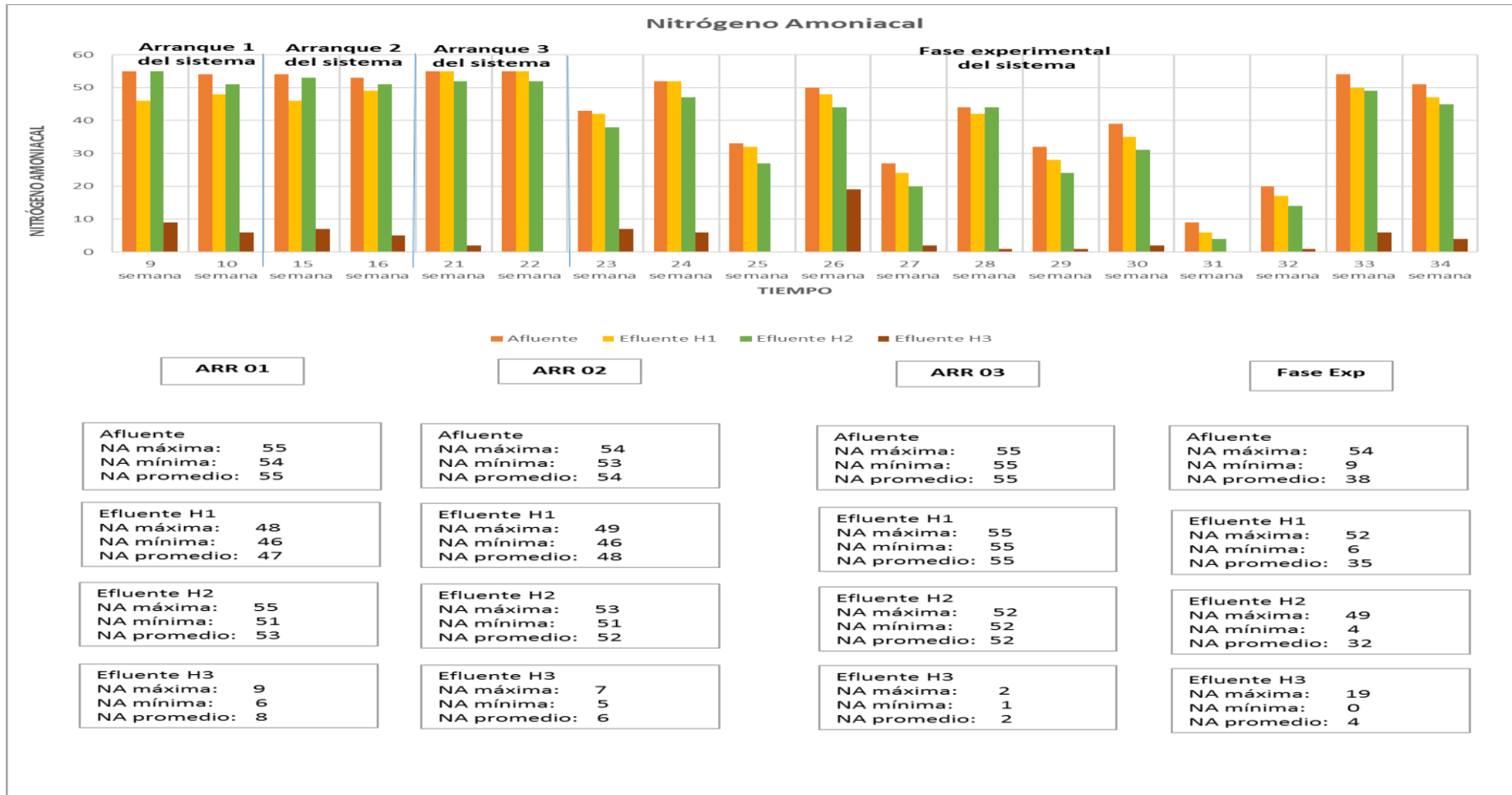


Figura 17. Gráfico de Barras en la Remoción de Nitrógeno Amoniacal Vs. Tiempo

Como se observa en la Figura 16, el humedal 3 (aireación intermitente) es quien presenta la mejor eficiencia de remoción de nitrógeno amoniacal. También se observa que en algunos casos el valor del Nitrógeno amoniacal llega a ser cero. Esto puede deberse a que el Nitrógeno amoniacal, en presencia de oxígeno, se convierte en Nitrito y en Nitrato. Sin embargo, esto no garantiza que se haya removido Nitrógeno del agua residual, sino que el Nitrógeno Amoniacal se ha transformado en otro compuesto químico nitrogenado (Nitrito o Nitrato) en presencia de oxígeno. Es decir, que se ha producido la nitrificación. Por otro lado, si se compara la eficiencia de remoción del humedal nuevo y el humedal antiguo se observa que inicialmente el humedal antiguo logra Nitrificar una mayor cantidad de Nitrógeno Amoniacal. Esto debido a que las raíces de las macrofitas del humedal antiguo son mucho más gruesas que la del humedal nuevo, por lo que generan una mayor cantidad de oxígeno para la nitrificación, lo que se puede corroborar al comparar las curvas de O.D. del humedal antiguo con las del nuevo. Sin embargo, una vez que se podó el humedal viejo y murieron las macrofitas (semana 18), se evidencia una disminución en la capacidad de nitrificación del humedal viejo. De esto se puede concluir que un humedal antiguo tiene mayor capacidad de nitrificación que uno nuevo, esto debido a la mayor oxigenación de sus raíces o quizás debido a la formación de bacterias especializadas en remoción de nitrógeno que habitan en las raíces antiguas.

6.4 Análisis de remoción de Nitritos

Tabla 15. Eficiencia de Remoción de los Nitritos

TIEMPO		NITRITO (mg/l)			
PERIODO	SEMANA	AFLUENTE	EFLUENTE (H ₁)	EFLUENTE (H ₂)	EFLUENTE (H ₃)
ARR 01	9	6	4	0	18
ARR 01	10	3	3	0	21
ARR 02	15	7	6	1	3
ARR 02	16	8	5	0	2
ARR 03	21	6	1	1	0
ARR 03	22	4	2	0	1
Fase Exp	23	6	3	2	0
Fase Exp	24	5	3	0	0
Fase Exp	25	6	4	2	0
Fase Exp	26	7	5	4	0
Fase Exp	27	6	2	2	0
Fase Exp	28	7	7	4	0
Fase Exp	29	7	6	3	1
Fase Exp	30	7	4	4	1
Fase Exp	31	6	3	1	1
Fase Exp	32	3	1	1	0
Fase Exp	33	7	4	1	0
Fase Exp	34	6	3	3	1

Tabla 16. Cuadro resumen Nitritos semanal

Durante	Periodo	Máximo				Mínimo				Promedio			
		Afluente	Efluente (H ₁)	Efluente (H ₂)	Efluente (H ₃)	Afluente	Efluente (H ₁)	Efluente (H ₂)	Efluente (H ₃)	Afluente	Efluente (H ₁)	Efluente (H ₂)	Efluente (H ₃)
ARR 01	2 sem	6	4	0	21	3	3	0	18	5	4	0	20
ARR 02	2 sem	8	6	1	3	7	5	0	2	8	6	1	3
ARR 03	2 sem	6	2	1	1	4	1	0	0	5	2	1	1
Fase Exp	12 sem	7	7	4	1	3	1	0	0	6	4	2	0

Tabla 17. Desviación estándar remoción de Nitritos

Durante	Periodo	Máximo			
		Afluente	Efluente (H ₁)	Efluente (H ₂)	Efluente (H ₃)
ARR 01	2 sem	2,1213	0,7071	0,0000	2,1213
ARR 02	2 sem	0,7071	0,7071	0,7071	0,7071
ARR 03	2 sem	1,4142	0,7071	0,7071	0,7071
Fase Exp	12 sem	1,1645	1,6583	1,3568	0,4924

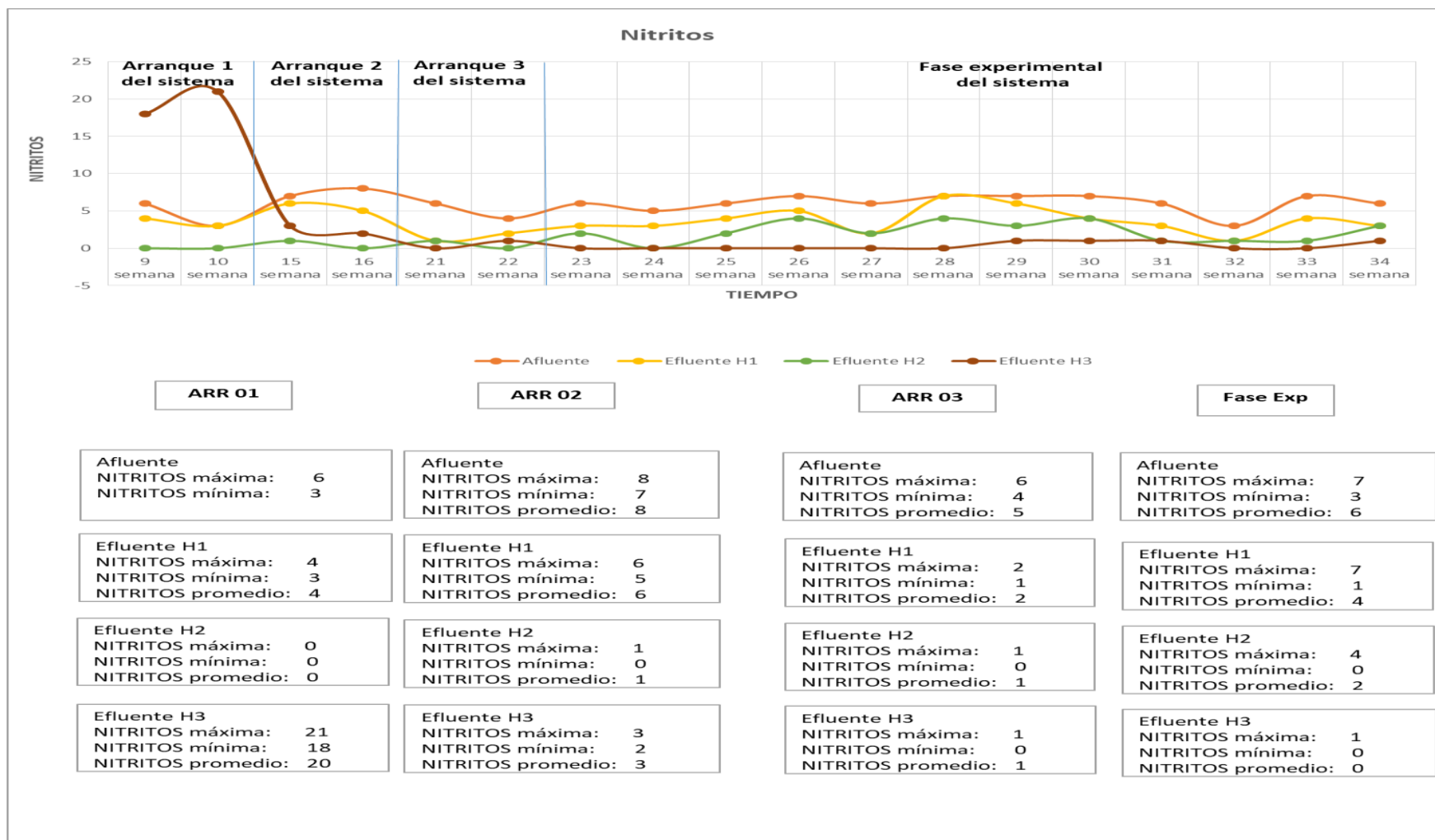


Figura 18. Gráfico de Líneas en la Remoción de Nitritos Vs. Tiempo

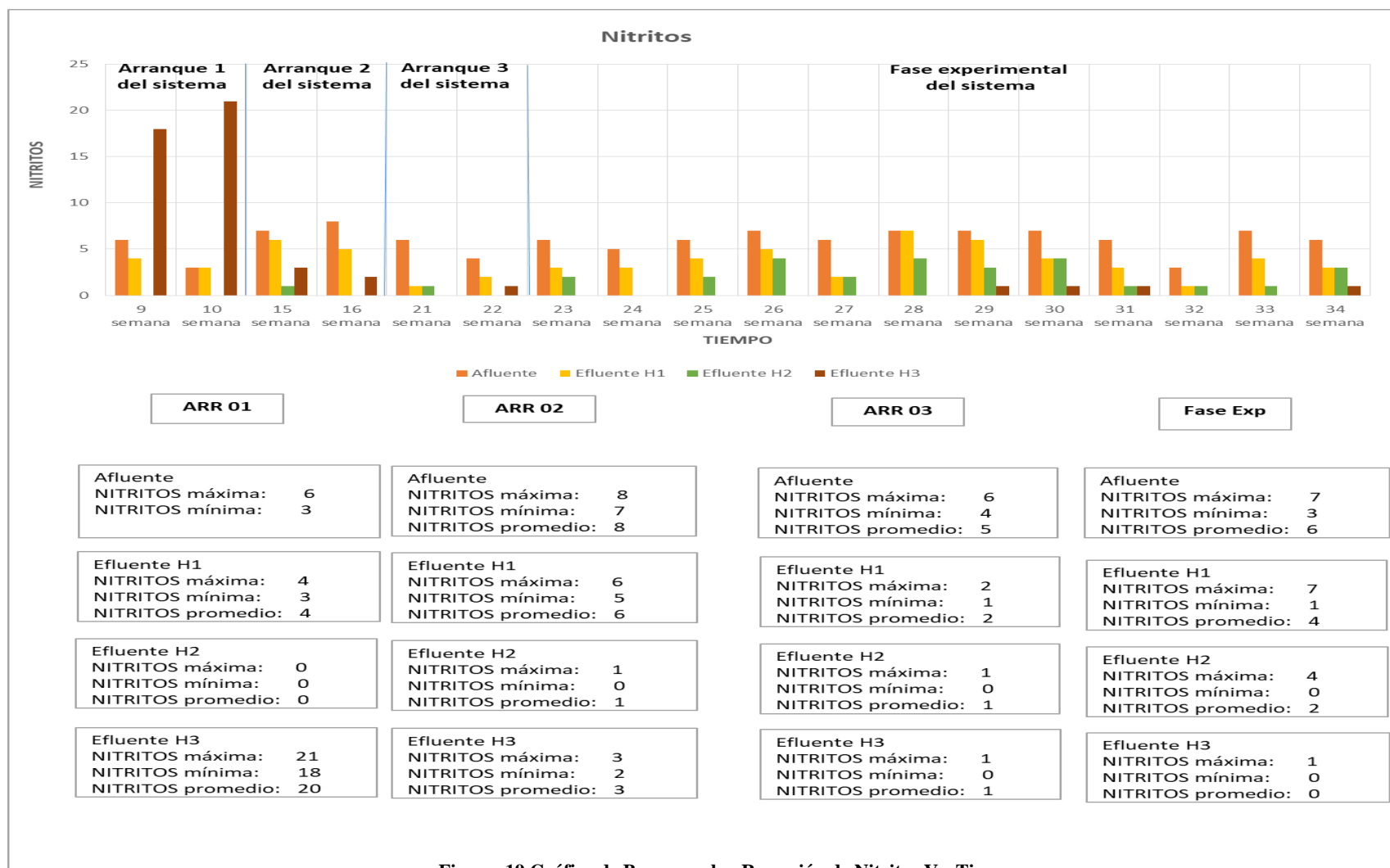


Figura 19. Gráfico de Barras en la Remoción de Nitritos Vs. Tiempo

En la figura 18 se observa que durante las semanas 9 y 10, el Nitrito a la salida del humedal con aireación intermitente presenta niveles muy altos. Esto podría deberse a que los tiempos de aireación y no aireación son muy grandes y no permiten que el medio se estabilice. Esto conlleva a tener nitrificación completa sin desnitrificación completa (toda la materia orgánica es estabilizada por el oxígeno y luego no hay materia orgánica suficiente para realizar una desnitrificación completa. Es decir, el nitrato solo es degradado hasta nitrito por las bacterias desnitrificantes, quedándose sin alimento suficiente para terminar de convertir el nitrito en nitrógeno gas). Durante las semanas 9 y 10 las plantas de estaban débiles, enfermas y no crecían mucho pues se envenenaban con el nitrito, que es un compuesto toxico en el agua.

Además, se observa que una vez que se redujeron los rangos de aireación y no aireación, los niveles de nitrito bajaron considerablemente a la salida del humedal s3, lo cual indica que se estaba equilibrando el proceso de nitrificación con el de desnitrificación.

Por otro lado, también se pudo corroborar que los niveles de nitrito a la salida del humedal antiguo son mayores a los del humedal nuevo en todo momento, sin embargo, esta diferencia es insignificante.

6.5 Análisis de remoción de Nitratos

Tabla 18.Eficiencia de Remoción de los Nitratos

TIEMPO		NITRATO (mg/l)			
PERIODO	SEMANA	AFLUENTE	EFLUENTE (H ₁)	EFLUENTE (H ₂)	EFLUENTE (H ₃)
ARR 01	9	1	1	1	19
ARR 01	10	1	1	1	14
ARR 02	15	1	1	1	31
ARR 02	16	1	1	1	33
ARR 03	21	1	0	1	31
ARR 03	22	1	0	1	31
Fase Exp	23	1	1	1	29
Fase Exp	24	1	1	1	28
Fase Exp	25	1	1	1	33
Fase Exp	26	1	1	1	20
Fase Exp	27	1	1	1	21
Fase Exp	28	1	0	1	32

Fase Exp	29	1	1	1	24
Fase Exp	30	1	1	1	33
Fase Exp	31	1	1	1	27
Fase Exp	32	1	1	1	30
Fase Exp	33	1	1	1	32
Fase Exp	34	0	1	1	31

Tabla 19. Resumen Semanal Remoción de Nitratos

Durante	Periodo	Máximo				Mínimo				Promedio			
		Afluente	Efluente (H1)	Efluente (H2)	Efluente (H3)	Afluente	Efluente (H1)	Efluente (H2)	Efluente (H3)	Afluente	Efluente (H1)	Efluente (H2)	Efluente (H3)
ARR 01	2 sem	1	1	1	19	1	1	1	14	1	1	1	17
ARR 02	2 sem	1	1	1	33	1	1	1	31	1	1	1	32
ARR 03	2 sem	1	0	1	31	1	0	1	31	1	0	1	31
Fase Exp	12 sem	1	1	1	33	0	0	1	20	1	1	1	28

Tabla 20. Desviación Estándar Remoción de Nitratos

Durante	Periodo				
		Afluente	Efluente (H ₁)	Efluente (H ₂)	Efluente (H ₃)
ARR 01	2 sem	0,2828	0,0707	0,0707	3,5638
ARR 02	2 sem	1,2000	1,3000	0,8000	33,0000
ARR 03	2 sem	0,8000	0,4000	0,7000	31,2000
Fase Exp	12 sem	1,3000	0,9000	0,9000	33,0000

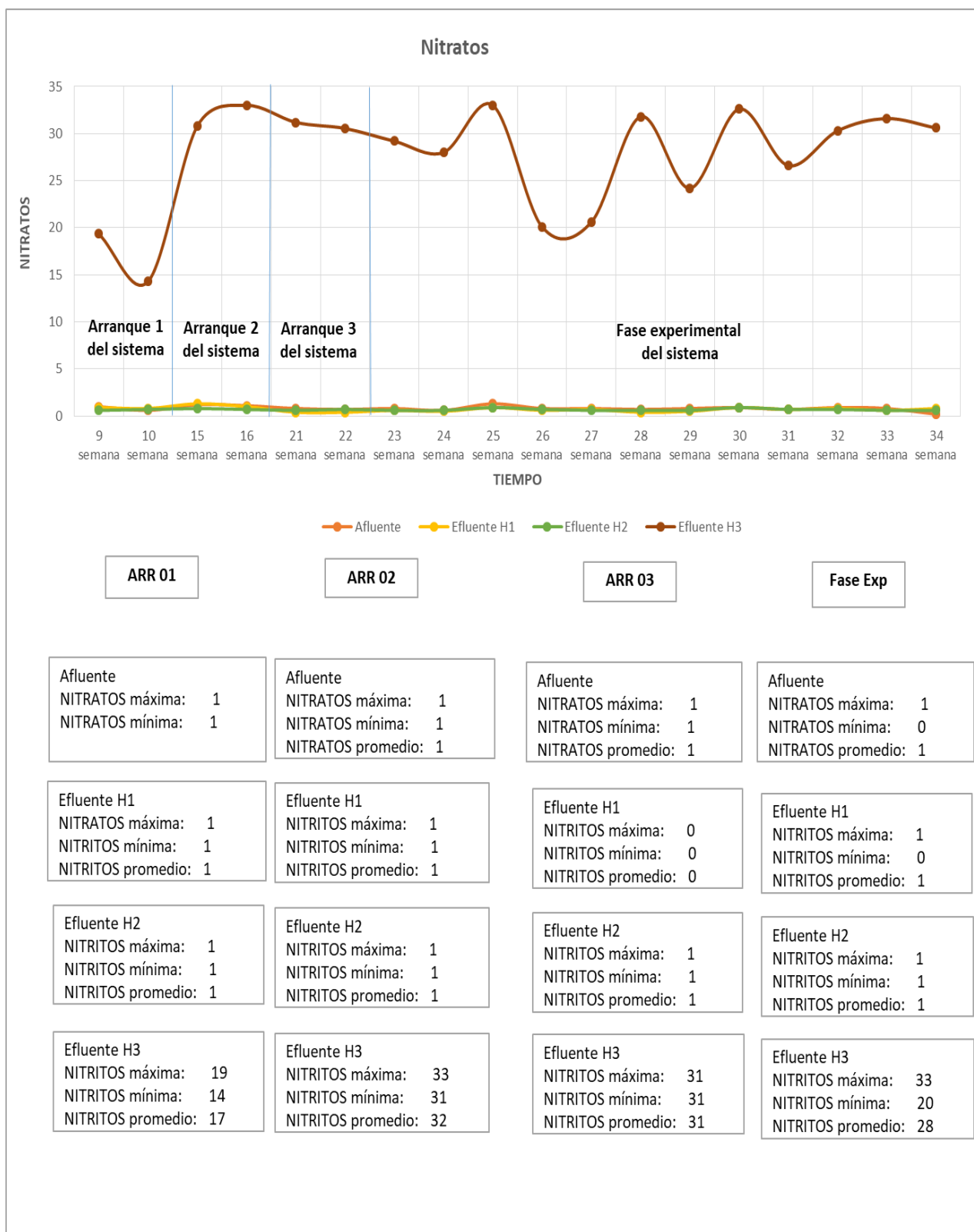


Figura 20. Gráfico de Líneas en la Remoción de Nitratos Vs. Tiempo

Se observa en la figura 20 que durante las semanas 9 y 10, el Nitrato a la salida del humedal con aireación intermitente presenta niveles bajos, debido a que la mayor parte del Nitrógeno Amónico se ha convertido en Nitrito como muestra el cuadro anterior.

Además, se observa que una vez que se redujeron los rangos de aireación y no aireación, los niveles de nitrato aumentaron considerablemente a la salida del humedal s3, lo cual indica que se estaba equilibrando el proceso de nitrificación con el de desnitrificación.

Por otro lado, los niveles de nitrato a la salida del humedal viejo son prácticamente iguales a los del humedal nuevo y prácticamente igual al de la entrada de los humedales en todo momento.

6.6 Análisis de remoción de DQO

Tabla 21.Eficiencia de la remoción de DQO

TIEMPO		DQO (mg/l)				EFICIENCIA		
PERIODO	SEMANA	AFLUENTE	EFLUENTE (H ₁)	EFLUENTE (H ₂)	EFLUENTE (H ₃)	H ₁	(H ₂)	(H ₃)
ARR 01	5	233	66	142	96	71,7%	39,1%	58,8%
ARR 01	6	219	72	134	79	67,1%	38,8%	63,9%
ARR 01	7	244	77	148	72	68,4%	39,3%	70,5%
ARR 01	8	208	82	112	64	60,6%	46,2%	69,2%
ARR 01	9	239	78	110	58	67,4%	54,0%	75,7%
ARR 01	10	236	74	97	56	68,6%	58,9%	76,3%
ARR 02	11	352	144	203	78	59,1%	42,3%	77,8%
ARR 02	12	238	97	125	71	59,2%	47,5%	70,2%
ARR 02	13	249	76	96	42	69,5%	61,4%	83,1%
ARR 02	14	261	95	104	33	63,6%	60,2%	87,4%
ARR 02	15	268	94	106	38	64,9%	60,4%	85,8%
ARR 02	16	259	106	103	36	59,1%	60,2%	86,1%
ARR 03	17	259	100	115	47	61,4%	55,6%	81,9%
ARR 03	18	247	78	85	26	68,4%	65,6%	89,5%
ARR 03	19	250	212	88	36	15,2%	64,8%	85,6%
ARR 03	20	233	198	91	24	15,0%	60,9%	89,7%
ARR 03	21	215	164	85	15	23,7%	60,5%	93,0%
ARR 03	22	241	159	123	19	34,0%	49,0%	92,1%

Fase Exp	23	199	138	119	12	30,7%	40,2%	94,0%
Fase Exp	24	169	123	115	4	27,2%	32,0%	97,6%
Fase Exp	25	194	113	94	10	41,8%	51,5%	94,8%
Fase Exp	26	227	144	135	13	36,6%	40,5%	94,3%
Fase Exp	27	189	128	117	15	32,3%	38,1%	92,1%
Fase Exp	28	184	153	112	6	16,8%	39,1%	96,7%
Fase Exp	29	213	134	114	13	37,1%	46,5%	93,9%
Fase Exp	30	248	191	174	14	23,0%	29,8%	94,4%
Fase Exp	31	195	132	109	13	32,3%	44,1%	93,3%
Fase Exp	32	186	121	100	9	34,9%	46,2%	95,2%
Fase Exp	33	193	113	102	12	41,5%	47,2%	93,8%
Fase Exp	34	231	138	110	12	40,3%	52,4%	94,8%

Tabla 22.- Resumen Remoción de DQO semanal

Durante	Periodo	Máximo				Mínimo				Promedio			
		Afluente	Efluente (H ₁)	Efluente (H ₂)	Efluente (H ₃)	Afluente	Efluente (H ₁)	Efluente (H ₂)	Efluente (H ₃)	Afluente	Efluente (H ₁)	Efluente (H ₂)	Efluente (H ₃)
ARR 01	6 sem	244	82	148	96	208	66	97	56	230	75	124	71
ARR 02	6 sem	352	144	203	78	238	76	96	33	271	102	123	50
ARR 03	6 sem	259	212	123	47	215	78	85	15	241	152	98	28
Fase Exp	12 sem	248	191	174	15	169	113	94	4	202	136	117	11

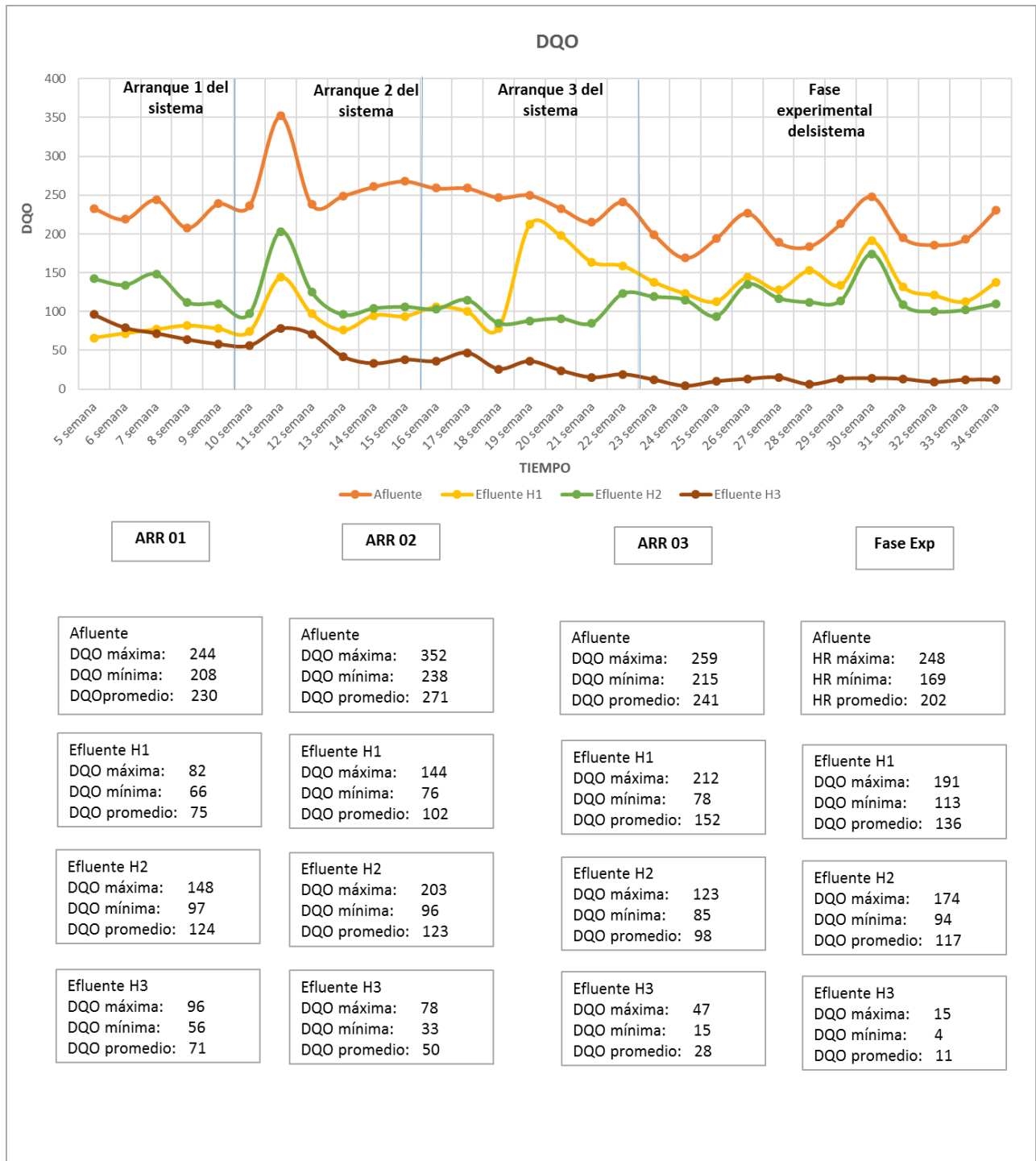


Figura 22. Gráfico de Líneas en la Remoción de la DQO



Figura 23. Gráfico de Barras en la Remoción de la DQO Vs. Tiempo

En la figura 23 se observa que el Humedal **H₃** es quien tiene la mayor eficiencia en remoción de DQO. Esta tendencia persiste aun cuando la DQO en el afluente alta. Asimismo, el Humedal **H₁** supera en eficiencia al Humedal **H₂** hasta la semana 18, que es cuando se poda excesivamente la totora de **H₁**, matándola. Luego de este accidente, la eficiencia de **H₁** comienza a recuperarse lentamente con las nuevas totoras plantadas.

6.7 Análisis de remoción de Fósforo Total

Tabla 23. Eficiencia de Remoción del Fósforo Total

TIEMPO		FÓSFORO TOTAL (mg/l)				EFICIENCIA		
PERIODO	SEMANA	AFLUENTE	EFLUENTE (H ₁)	EFLUENTE (H ₂)	EFLUENTE (H ₃)	H ₁	H ₂	H ₃
ARR 01	9	20	19	15	14	6,9%	23,8%	31,7%
ARR 01	10	22	21	16	14	5,5%	24,9%	35,9%
ARR 02	15	19	18	15	13	7,7%	21,1%	35,1%
ARR 02	16	18	17	14	12	3,4%	21,2%	31,8%
ARR 03	21	21	22	16	15	0,9%	24,3%	32,2%
ARR 03	22	24	24	20	16	-0,4%	15,5%	31,9%
Fase Exp	23	20	19	17	15	2,0%	14,3%	24,5%
Fase Exp	24	20	19	17	16	4,0%	13,9%	19,9%
Fase Exp	25	17	15	13	12	12,1%	18,8%	24,8%
Fase Exp	26	19	17	16	15	9,0%	14,9%	21,8%
Fase Exp	27	25	26	23	21	-0,8%	11,1%	17,4%
Fase Exp	28	22	21	19	17	0,5%	13,0%	20,5%
Fase Exp	29	19	18	18	16	5,3%	7,9%	15,8%
Fase Exp	30	22	22	20	18	1,4%	10,4%	19,5%
Fase Exp	31	18	17	16	14	7,7%	13,7%	23,0%
Fase Exp	32	21	20	19	17	3,4%	10,2%	18,0%
Fase Exp	33	17	16	15	14	6,5%	11,8%	18,9%
Fase Exp	34	17	17	16	14	1,2%	4,2%	13,3%

Tabla 24. Resumen Fósforo Total semanal

Durante	Periodo	Máximo				Mínimo				Promedio			
		Afluyente	Efluente (H ₁)	Efluente (H ₂)	Efluente (H ₃)	Afluyente	Efluente (H ₁)	Efluente (H ₂)	Efluente (H ₃)	Afluyente	Efluente (H ₁)	Efluente (H ₂)	Efluente (H ₃)
ARR 01	6 sem	22	21	16	14	20	19	15	14	21	20	16	14
ARR 02	6 sem	19	18	15	13	18	17	14	12	19	18	15	12
ARR 03	6 sem	24	24	20	16	21	22	16	15	23	23	18	15
Fase Exp	12 sem	25	26	23	21	17	15	13	12	20	19	17	16

Tabla 25 – Desviación Estándar Fósforo Total

Durante	Periodo	Máximo			
		Afluyente	Efluente (H ₁)	Efluente (H ₂)	Efluente (H ₃)
ARR 01	6 sem	1,0607	1,2021	0,6364	0,0707
ARR 02	6 sem	1,0607	0,4243	0,8485	0,2828
ARR 03	6 sem	1,6971	1,6263	2,7577	1,2021
Fase Exp	12 sem	2,5726	3,0345	2,4142	2,2625

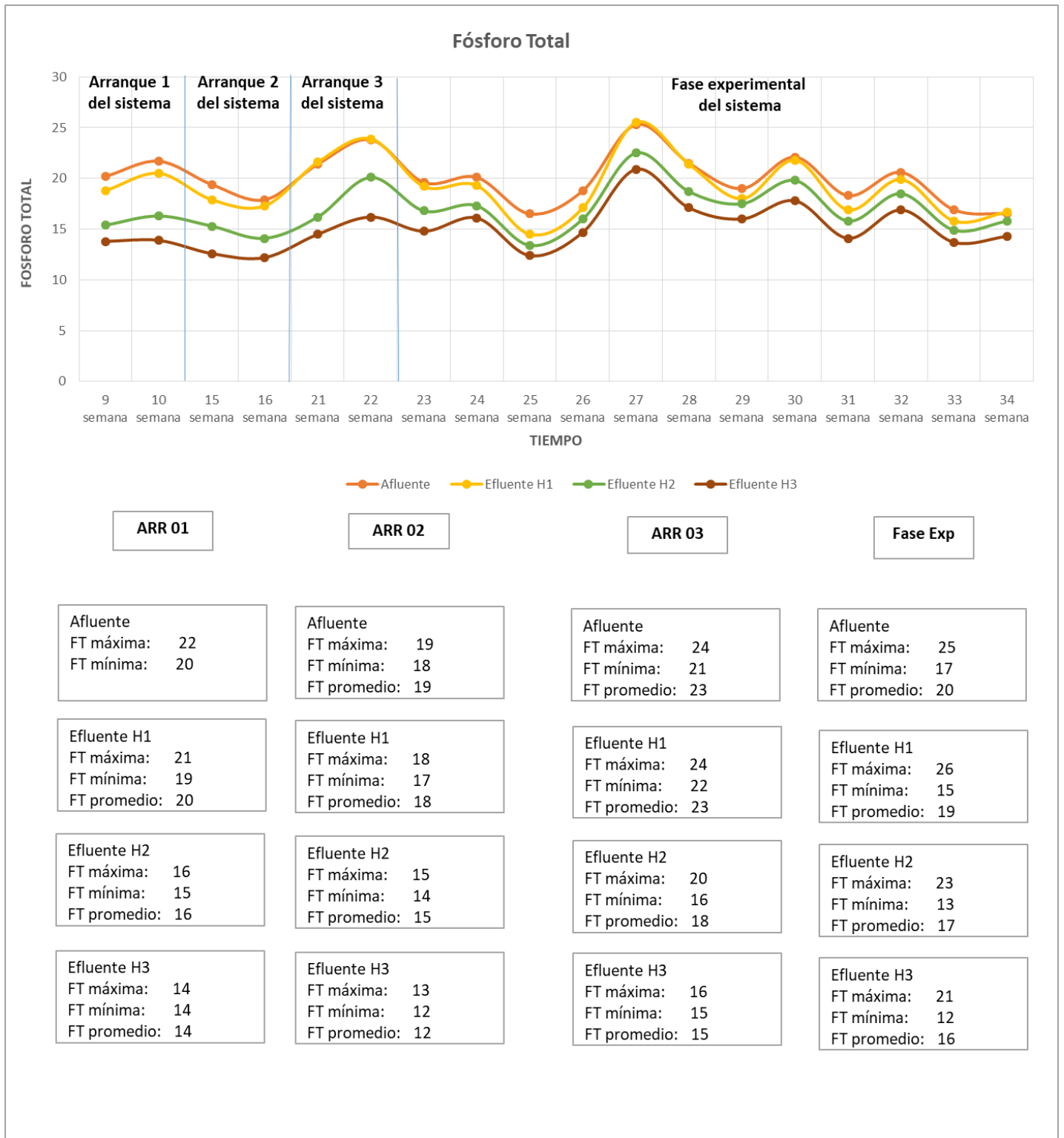


Figura 24. Gráfico de Líneas en la Remoción de Fósforo Total Vs. Tiempo

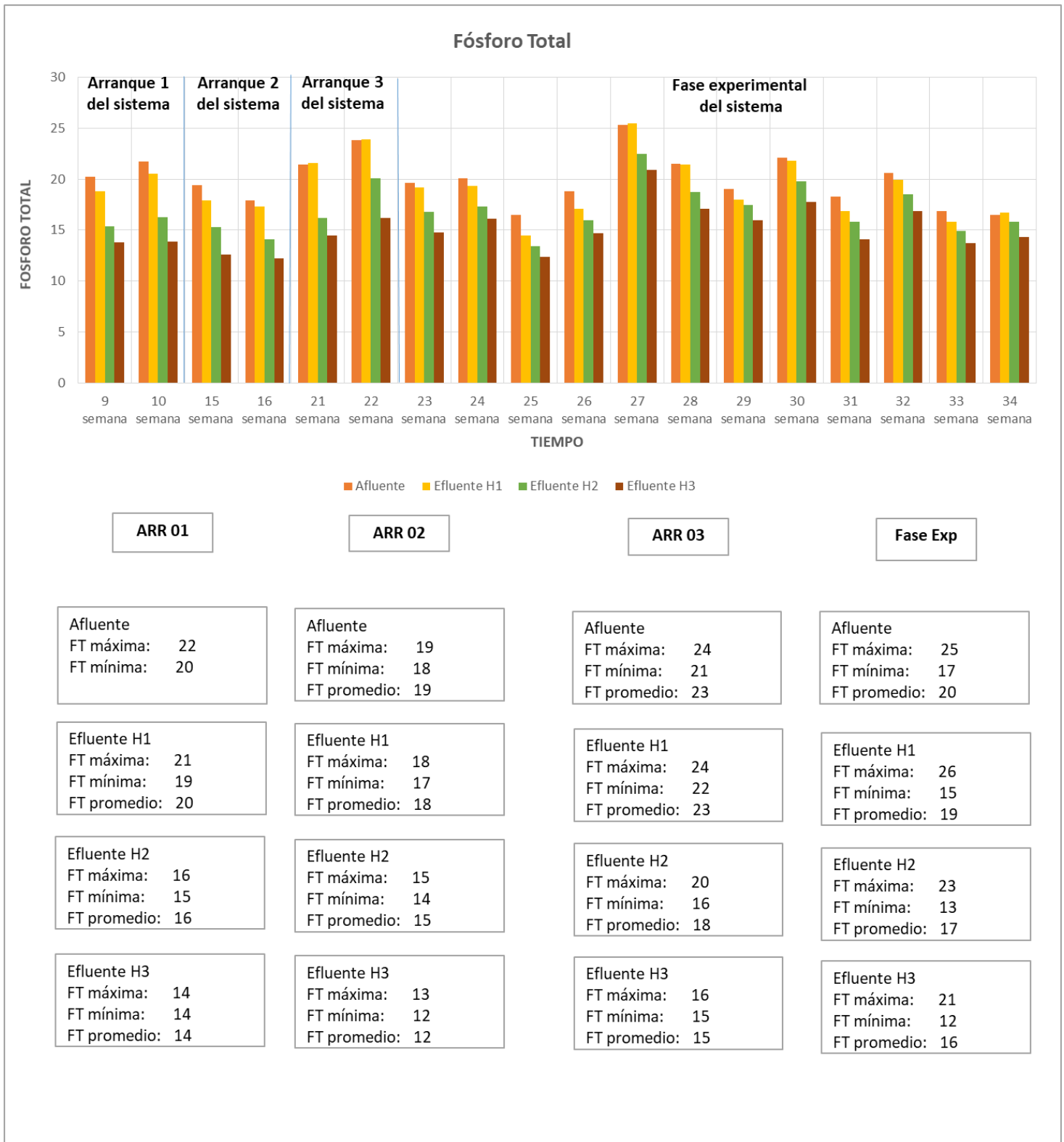


Figura 25. Gráfico de Barras en la Remoción de Fósforo Total Vs. Tiempo

En la Figura 24 se muestra que el humedal con aireación intermitente es quien más fósforo total remueve, sin embargo, la diferencia respecto a los otros humedales no es muy significativa. Además, se observa que el humedal antiguo (H_1) no presenta mucha capacidad para remover fósforo, más aún, en las semanas 21, 22, 27, 30 y 34 la concentración de fósforo del efluente es ligeramente mayor al del afluente. También se aprecia que a medida que transcurre el tiempo, los humedales van presentando una menor capacidad para remover fósforo. De esto se concluye que la capacidad de un humedal para remover fosforo del agua residual disminuye con el paso del tiempo debido a que el medio filtrante se va saturando, llegando incluso a desprenderse porciones de fosforo del medio cuando el humedal está bastante saturado, como es el caso del humedal antiguo en donde la concentración de fósforo del efluente es mayor a la del afluente debido al desprendimiento.

6.8 Análisis de remoción de Turbiedad

Se muestra de manera más dinámica el comportamiento de la turbiedad tanto para el afluente como para los efluentes de los tres humedales.

TIEMPO		TURBIEDAD (NTU)				EFICIENCIA		
PERIODO	SEMANA	AFLUENTE	EFLUENTE (H ₁)	EFLUENTE (H ₂)	EFLUENTE (H ₃)	H ₁	H ₂	H ₃
ARR 01	5	51,9	9,1	21,5	6,5	82,4%	58,6%	87,6%
ARR 01	6	64,6	11,8	22,5	6,8	81,7%	65,2%	89,5%
ARR 01	7	63,4	11,8	27,2	5,6	81,3%	57,1%	91,1%
ARR 01	8	58,8	8,4	17,1	3,8	85,7%	70,9%	93,6%
ARR 01	9	66,9	11,7	18,4	4,2	82,5%	72,6%	93,8%
ARR 01	10	59,6	11,7	13,6	6,8	80,4%	77,2%	88,6%
ARR 02	11	182,1	69,1	80,4	29,1	62,0%	55,8%	84,0%
ARR 02	12	57,1	23,5	47,9	16,8	58,8%	16,2%	70,6%
ARR 02	13	90,2	24,2	24,5	13,4	73,2%	72,9%	85,2%
ARR 02	14	74,0	11,4	14,0	3,5	84,6%	81,0%	95,2%
ARR 02	15	108,3	12,2	17,3	18,1	88,8%	84,0%	83,3%
ARR 02	16	120,7	27,0	39,1	13,8	77,6%	67,6%	88,6%
ARR 03	17	135,8	17,2	40,6	4,0	87,3%	70,1%	97,0%
ARR 03	18	124,4	15,0	15,4	3,9	87,9%	87,6%	96,9%
ARR 03	19	112,2	86,2	19,4	5,9	23,2%	82,7%	94,7%
ARR 03	20	79,1	62,4	8,6	1,8	21,1%	89,2%	97,8%
ARR 03	21	72,0	50,1	17,1	4,1	30,4%	76,3%	94,2%
ARR 03	22	75,4	46,4	37,4	2,4	38,5%	50,4%	96,8%
Fase Exp	23	96,3	39,8	29,9	9,4	58,7%	69,0%	90,3%
Fase Exp	24	74,3	33,1	30,2	1,6	55,5%	59,4%	97,8%
Fase Exp	25	76,4	34,4	27,7	4,9	55,0%	63,8%	93,5%
Fase Exp	26	119,6	58,3	32,4	10,1	51,2%	72,9%	91,5%
Fase Exp	27	91,5	33,0	30,1	13,1	64,0%	67,1%	85,7%

Fase Exp	28	70,3	43,9	31,6	1,2	37,6%	55,0%	98,4%
Fase Exp	29	54,9	31,7	31,4	11,3	42,2%	42,7%	79,5%
Fase Exp	30	73,3	44,4	41,9	1,8	39,4%	42,8%	97,5%
Fase Exp	31	65,8	49,1	33,1	2,4	25,3%	49,7%	96,4%
Fase Exp	32	57,9	35,1	24,1	2,5	39,3%	58,5%	95,6%
Fase Exp	33	76,2	24,9	18,8	5,6	67,4%	75,4%	92,7%
Fase Exp	34	62,4	28,3	15,0	7,5	54,6%	76,0%	88,0%

Tabla 26. Eficiencia de Remoción de la Turbiedad

Dónde: ARR. <> Arranque; Fase Exp <> Fase Experimental; H₁ <> Humedal 1; H₂ <> Humedal 2; H₃ <> Humedal 3

Tabla 27 – Resumen Remoción Semanal Turbiedad

TIEMPO	Turbiedad Máxima Afluente				Turbiedad Mínima Afluente				Turbiedad Promedio			
	AFLUENTE	EFLUENTE (H ₁)	EFLUENTE (H ₂)	EFLUENTE (H ₃)	AFLUENTE	EFLUENTE (H ₁)	EFLUENTE (H ₂)	EFLUENTE (H ₃)	AFLUENTE	EFLUENTE (H ₁)	EFLUENTE (H ₂)	EFLUENTE (H ₃)
ARR 01	66,9	11,7	18,4	4,2	51,9	9,1	21,5	6,5	60,9	10,8	20,0	5,6
ARR 02	182,1	69,1	80,4	29,1	57,1	23,5	47,9	16,8	105,4	27,9	37,2	15,8
ARR 03	135,8	17,2	40,6	4,0	72,0	50,1	17,1	4,1	99,8	46,2	23,1	3,7
Fase Exp	119,6	58,3	32,4	10,1	54,9	31,7	31,4	11,3	76,6	38,0	28,8	5,9

Tabla 28 – Desviación estándar

TIEMPO	Eficiencia Promedio			Máxima Eficiencia			Mínima eficiencia		
	H ₁	H ₂	H ₃	H ₁	H ₂	H ₃	H ₁	H ₂	H ₃
ARR 01	82,3%	66,9%	90,7%	85,7%	77,2%	93,8%	80,4%	57,1%	87,6%
ARR 02	74,2%	62,9%	84,5%	88,8%	84,0%	95,2%	58,8%	16,2%	70,6%
ARR 03	48,1%	76,0%	96,2%	87,9%	89,2%	97,8%	21,1%	50,4%	94,2%
Fase Exp	49,2%	61,0%	92,2%	67,4%	76,0%	98,4%	25,3%	42,7%	79,5%

COMPORTAMIENTO DE LA TURBIEDAD

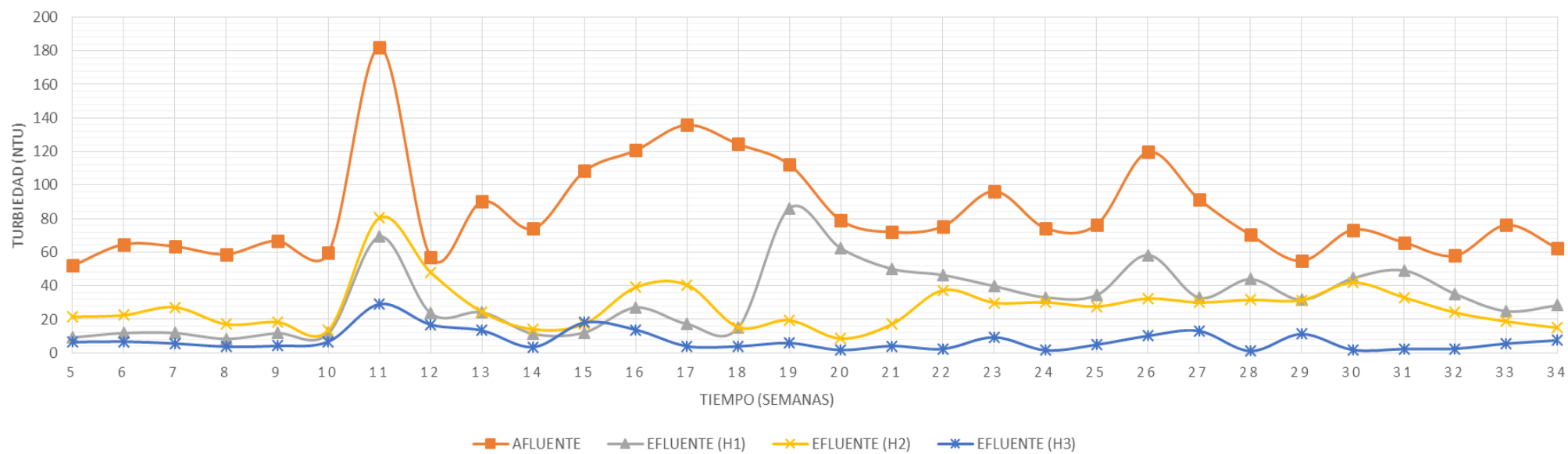


Figura 26. Gráfico de Líneas en la Remoción de la turbiedad Vs. Tiempo

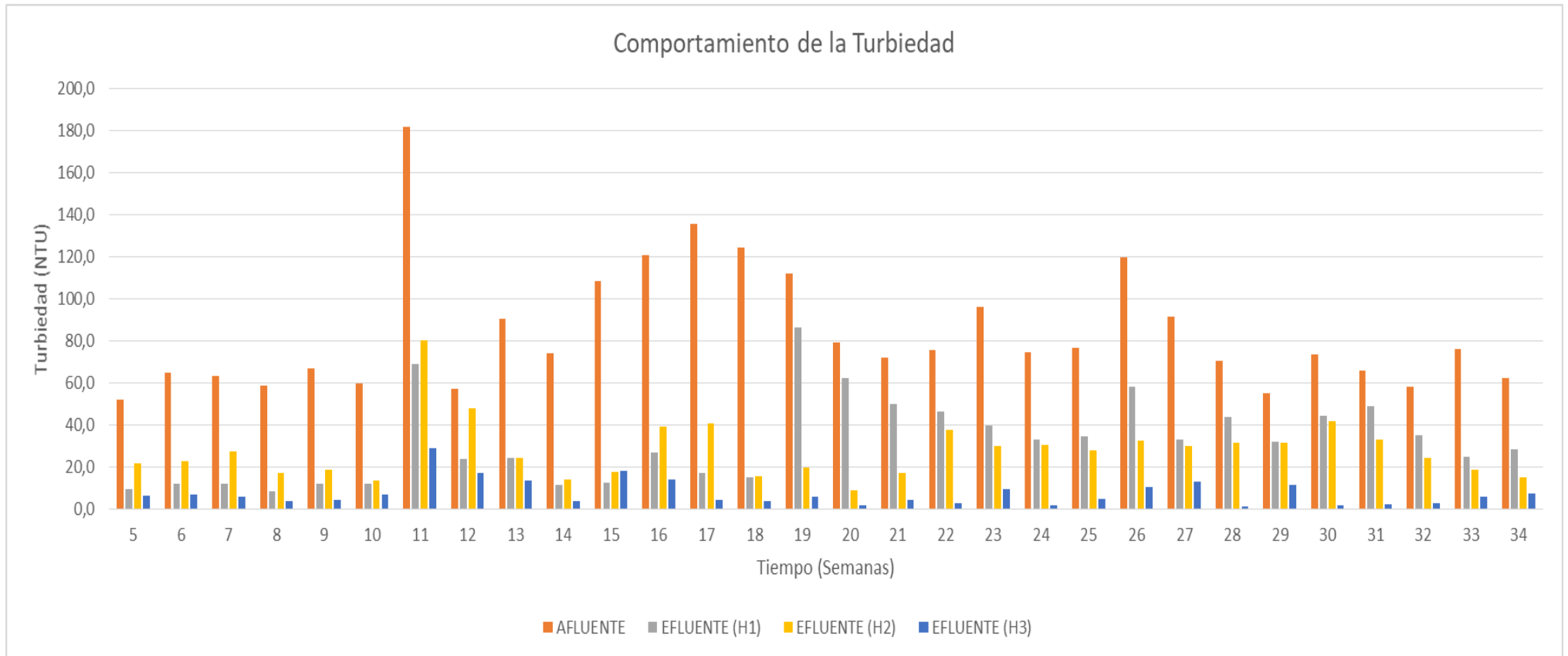


Figura 27. Gráfico de Barras en la Remoción de la turbiedad Vs. Tiempo

Para el caso de los tres humedales, el afluente es el mismo, teniendo estos distintos valores de turbiedad en cada semana que se hizo la medición, siendo el valor promedio de 84 NTU; sin embargo, existen semanas en donde hubo valores picos como en la semana 11 y 17, cuyos valores de turbiedad fueron 182,1 y 135,8 NTU, respectivamente.

Se puede observar que el Humedal **H₃** es el que presenta la mejor eficiencia de remoción de Turbiedad, sobre todo cuando la turbiedad que ingresa es alta. Asimismo el Humedal **H₁** supera en eficiencia al Humedal **H₂** hasta la semana 18, que es cuando se poda excesivamente la totora de **H₁**, matándola. Luego de este accidente, la eficiencia de **H₁** comienza a recuperarse lentamente con las nuevas totoras plantadas.

6.9 Análisis de la variación del pH

Durante la etapa de experimentación, se midió el pH dos veces al día (09:00 hrs y 15:00 hrs), así se fue evaluando diariamente durante 30 semanas, desde la semana 5 hasta la semana 34.

En la Tabla 29 se presentan los resultados obtenidos de las mediciones semanales de pH.

Tabla 29 – Variación del pH semanal por Humedal

TIEMPO		PH			
PERIODO	SEMANA	AFLUENTE	EFLUENTE (H ₁)	EFLUENTE (H ₂)	EFLUENTE (H ₃)
ARR 01	5	7,6	7,0	7,3	7,6
ARR 01	6	7,3	7,0	7,3	7,4
ARR 01	7	7,6	7,2	7,4	7,7
ARR 01	8	7,5	7,1	7,3	7,8
ARR 01	9	7,7	7,1	7,3	7,8
ARR 01	10	7,6	7,2	7,4	7,7
ARR 02	11	7,7	7,2	7,4	7,8
ARR 02	12	7,8	7,3	7,4	7,7
ARR 02	13	7,3	6,9	6,9	7,5
ARR 02	14	7,4	7,0	7,2	6,8
ARR 02	15	7,7	7,2	7,3	7,1
ARR 02	16	7,6	7,2	7,4	7,6
ARR 03	17	7,2	7,0	7,3	6,6
ARR 03	18	7,5	7,1	7,2	6,6
ARR 03	19	7,5	7,4	7,3	7,6

ARR 03	20	7,3	7,3	7,3	6,8
ARR 03	21	7,7	7,1	7,3	7,7
ARR 03	22	7,2	7,3	7,2	7,2
Fase Exp	23	7,1	7,3	7,3	7,3
Fase Exp	24	7,1	7,3	7,3	7,4
Fase Exp	25	7,1	7,3	7,2	7,2
Fase Exp	26	7,4	7,1	7,4	7,5
Fase Exp	27	7,3	6,8	7,3	7,5
Fase Exp	28	7,0	7,3	7,3	7,3
Fase Exp	29	7,0	7,3	7,2	7,4
Fase Exp	30	6,9	7,3	7,1	7,0
Fase Exp	31	6,9	7,3	7,2	7,1
Fase Exp	32	6,9	7,3	7,2	7,2
Fase Exp	33	7,3	7,1	7,2	7,5
Fase Exp	34	7,2	7,3	7,2	7,3

Dónde: ARR. <> Arranque; Fase Exp <> Fase Experimental; H₁ <> Humedal 1; H₂ <> Humedal 2; H₃ <> Humedal 3

Tabla 30 – Resumen Variación del pH

TIE MPO	pH Máximo Afluente				pH Mínimo Afluente				pH Promedio			
	AFLU ENTE	EFLU ENTE (H ₁)	EFLU ENTE (H ₂)	EFLU ENTE (H ₃)	AFLU ENTE	EFLU ENTE (H ₁)	EFLU ENTE (H ₂)	EFLU ENTE (H ₃)	AFLU ENTE	EFLU ENTE (H ₁)	EFLU ENTE (H ₂)	EFLU ENTE (H ₃)
ARR 01	7,7	7,1	7,3	7,8	7,3	7,0	7,3	7,4	7,5	7,1	7,3	7,7
ARR 02	7,8	7,3	7,4	7,7	7,3	6,9	6,9	7,5	7,6	7,1	7,3	7,4
ARR 03	7,7	7,1	7,3	7,7	7,2	7,3	7,2	7,2	7,4	7,2	7,3	7,1
Fase Exp	7,4	7,1	7,4	7,5	6,9	7,3	7,1	7,0	7,1	7,2	7,2	7,3

En la Figura 28 se muestra el comportamiento de las variaciones de los valores de pH a lo largo del periodo de experimentación.

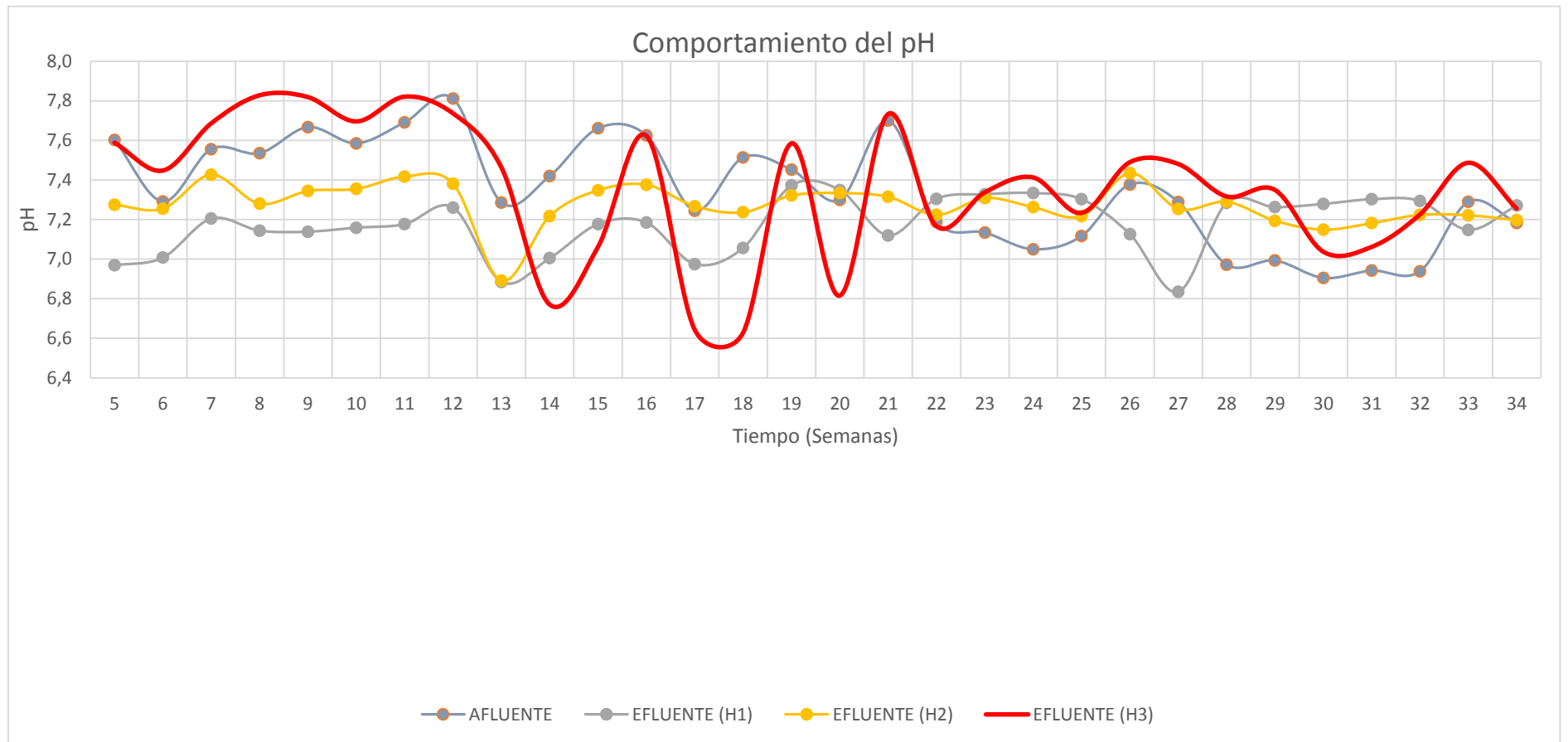


Figura 28. Variación del pH

De la Figura 28 se pueden observar que los valores más altos de pH se obtuvieron del efluente del humedal **H₃**, con un valor promedio de 7.5 , seguido del pH del humedal **H₂** con un valor promedio de 7.3, y por último el pH del humedal **H₁**, con un valor promedio de 7.1

6.10 Análisis de la variación de la Temperatura Ambiental

Tabla 31 – Temperatura Ambiental

TIEMPO		TEMPERATURA AMBIENTE
PERIODO	SEMANA	
ARR 01	5	30,5 °C
ARR 01	6	30,3 °C
ARR 01	7	27,7 °C
ARR 01	8	26,7 °C
ARR 01	9	28,5 °C
ARR 01	10	27,1 °C
ARR 02	11	27,4 °C
ARR 02	12	23,9 °C
ARR 02	13	23,0 °C
ARR 02	14	21,9 °C
ARR 02	15	23,4 °C
ARR 02	16	20,6 °C
ARR 03	17	22,0 °C
ARR 03	18	21,3 °C
ARR 03	19	22,8 °C
ARR 03	20	20,4 °C
ARR 03	21	28,2 °C
ARR 03	22	28,4 °C
Fase Exp	23	19,7 °C
Fase Exp	24	20,8 °C
Fase Exp	25	22,4 °C
Fase Exp	26	19,8 °C
Fase Exp	27	20,1 °C
Fase Exp	28	20,7 °C
Fase Exp	29	22,5 °C
Fase Exp	30	22,0 °C
Fase Exp	31	22,2 °C
Fase Exp	32	28,8 °C
Fase Exp	33	21,7 °C
Fase Exp	34	21,5 °C

Tabla 32 - Resumen T° Ambiente por periodo

Durante	Periodo	Máximo	Mínimo	Promedio
		Afluyente	Afluyente	Afluyente
ARR 01	6 sem	30,5 %	26,7 %	28,5 %
ARR 02	6 sem	27,4 %	20,6 %	23,4 %
ARR 03	6 sem	28,4 %	20,4 %	23,8 %
Fase Exp	12 sem	28,8 %	19,7 %	21,8 %

Tabla 33 – Desviación Estándar

Durante	Periodo	Desviación Estándar
		Afluyente
ARR 01	6 sem	1,6005
ARR 02	6 sem	2,2892
ARR 03	6 sem	3,5311
Fase Exp	12 sem	2,4083

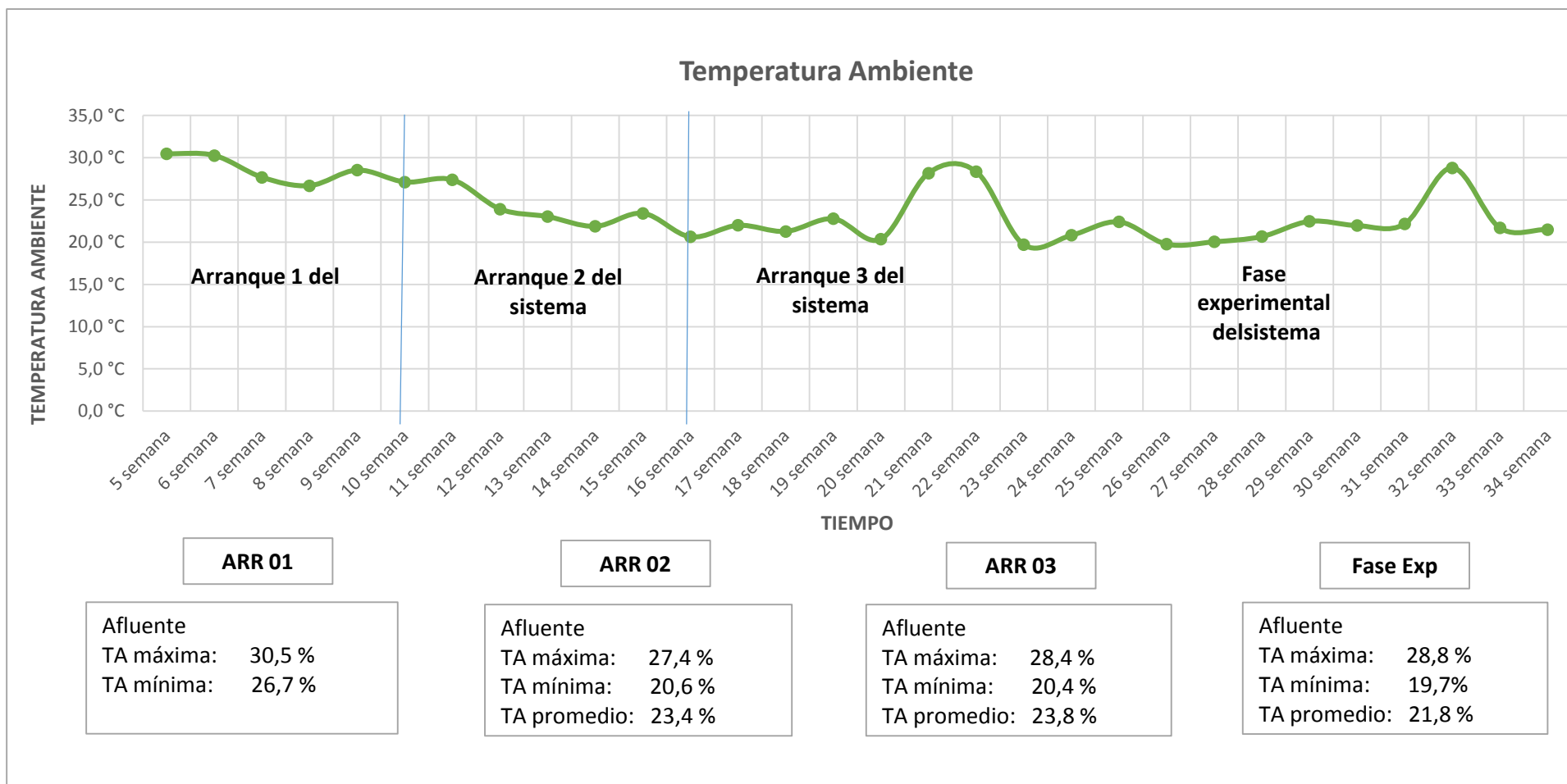


Figura 29.– Gráfico de Líneas en la Variación de la Temperatura Ambiental Vs. Tiempo

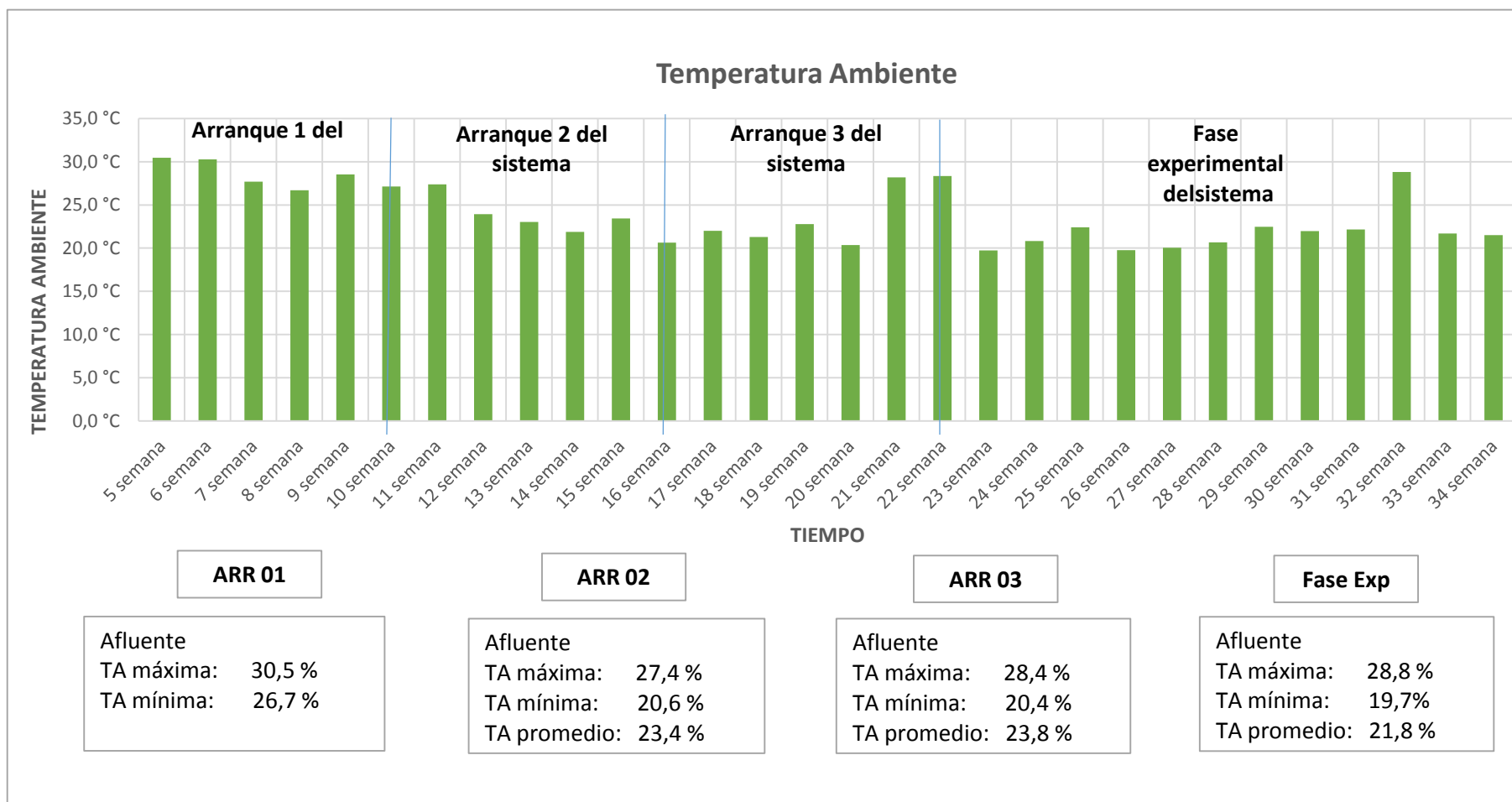


Figura 30. Gráfico de Barras en la Variación de la Temperatura Ambiental Vs. Tiempo

6.11 Análisis de la variación de la Temperatura del agua

La temperatura se midió 2 veces por día (09:00 hrs y 15:00hrs); la cual, dicho parámetro se evaluó diariamente durante 30 semanas, desde la semana 5 hasta la semana 34. En la Tabla 34, se muestran los resultados de las mediciones semanales de temperatura, tanto para el afluente como para el efluente de cada humedal.

Tabla 34 - Temperatura del agua

TIEMPO		TEMPERATURA DEL AGUA (°C)				TEMPERATURA AMBIENTE
PERIODO	SEMANA	AFLUENTE	EFLUENTE (H ₁)	EFLUENTE (H ₂)	EFLUENTE (H ₃)	
ARR 01	5	29,6	28,5	28,6	28,6	30,5 °C
ARR 01	6	29,5	28,2	28,0	28,1	30,3 °C
ARR 01	7	27,8	27,2	27,2	27,2	27,7 °C
ARR 01	8	26,9	25,6	25,7	25,8	26,7 °C
ARR 01	9	28,1	26,8	26,6	26,9	28,5 °C
ARR 01	10	27,4	25,9	25,8	26,1	27,1 °C
ARR 02	11	27,8	25,8	26,1	26,2	27,4 °C
ARR 02	12	24,0	22,4	22,5	22,4	23,9 °C
ARR 02	13	22,8	21,8	21,4	21,6	23,0 °C
ARR 02	14	22,2	21,0	21,1	21,3	21,9 °C
ARR 02	15	23,8	22,3	22,3	22,3	23,4 °C
ARR 02	16	20,5	19,4	19,6	19,6	20,6 °C
ARR 03	17	21,9	20,4	20,5	20,7	22,0 °C
ARR 03	18	21,4	19,6	19,7	19,9	21,3 °C
ARR 03	19	21,2	20,2	20,3	20,4	22,8 °C
ARR 03	20	20,3	18,9	19,1	19,1	20,4 °C
ARR 03	21	27,2	26,1	25,9	26,1	28,2 °C
ARR 03	22	20,3	19,7	19,7	19,6	28,4 °C
Fase Exp	23	19,6	19,0	19,1	19,3	19,7 °C
Fase Exp	24	20,0	19,6	19,5	19,5	20,8 °C
Fase Exp	25	21,3	20,5	20,5	20,6	22,4 °C
Fase Exp	26	19,8	18,3	18,2	18,4	19,8 °C
Fase Exp	27	19,1	18,4	18,6	18,5	20,1 °C
Fase Exp	28	20,7	19,8	19,9	19,9	20,7 °C
Fase Exp	29	21,7	20,9	21,1	21,0	22,5 °C
Fase Exp	30	21,4	20,6	20,6	20,6	22,0 °C

Fase Exp	31	20,8	20,5	20,5	20,4	22,2 °C
Fase Exp	32	22,3	22,4	22,4	22,4	28,8 °C
Fase Exp	33	21,5	20,1	20,1	20,0	21,7 °C
Fase Exp	34	22,4	21,1	21,0	20,9	21,5 °C

Dónde: ARR. <> Arranque; Fase Exp <> Fase Experimental; H_1 <> Humedal 1; H_2 <> Humedal 2; H_3 <> Humedal 3

Tabla 35 – Resumen de la variación de la Temperatura del Agua

TIEMPO	Temperatura Máxima Afluente				Temperatura Mínima Afluente				Temperatura Promedio				Temperatura Ambiental Promedio
PERIODO	AFLUENTE	EFLUENTE (H₁)	EFLUENTE (H₂)	EFLUENTE (H₃)	AFLUENTE	EFLUENTE (H₁)	EFLUENTE (H₂)	EFLUENTE (H₃)	AFLUENTE	EFLUENTE (H₁)	EFLUENTE (H₂)	EFLUENTE (H₃)	
ARR 01	29,6	28,5	28,6	28,6	26,9	25,6	25,7	25,8	28,2	27,0	27,0	27,1	28,5
ARR 02	27,8	25,8	26,1	26,2	20,5	19,4	19,6	19,6	23,5	22,1	22,2	22,2	23,4
ARR 03	27,2	26,1	25,9	26,1	20,3	18,9	19,1	19,1	22,0	20,8	20,9	21,0	23,8
Fase Exp	22,4	21,1	21,0	20,9	19,1	18,4	18,6	18,5	20,9	20,1	20,1	20,1	21,8

En la Figura 31 se muestra el comportamiento de las variaciones de temperatura, tanto del afluente como del efluente de cada humedal, a lo largo del periodo de experimentación

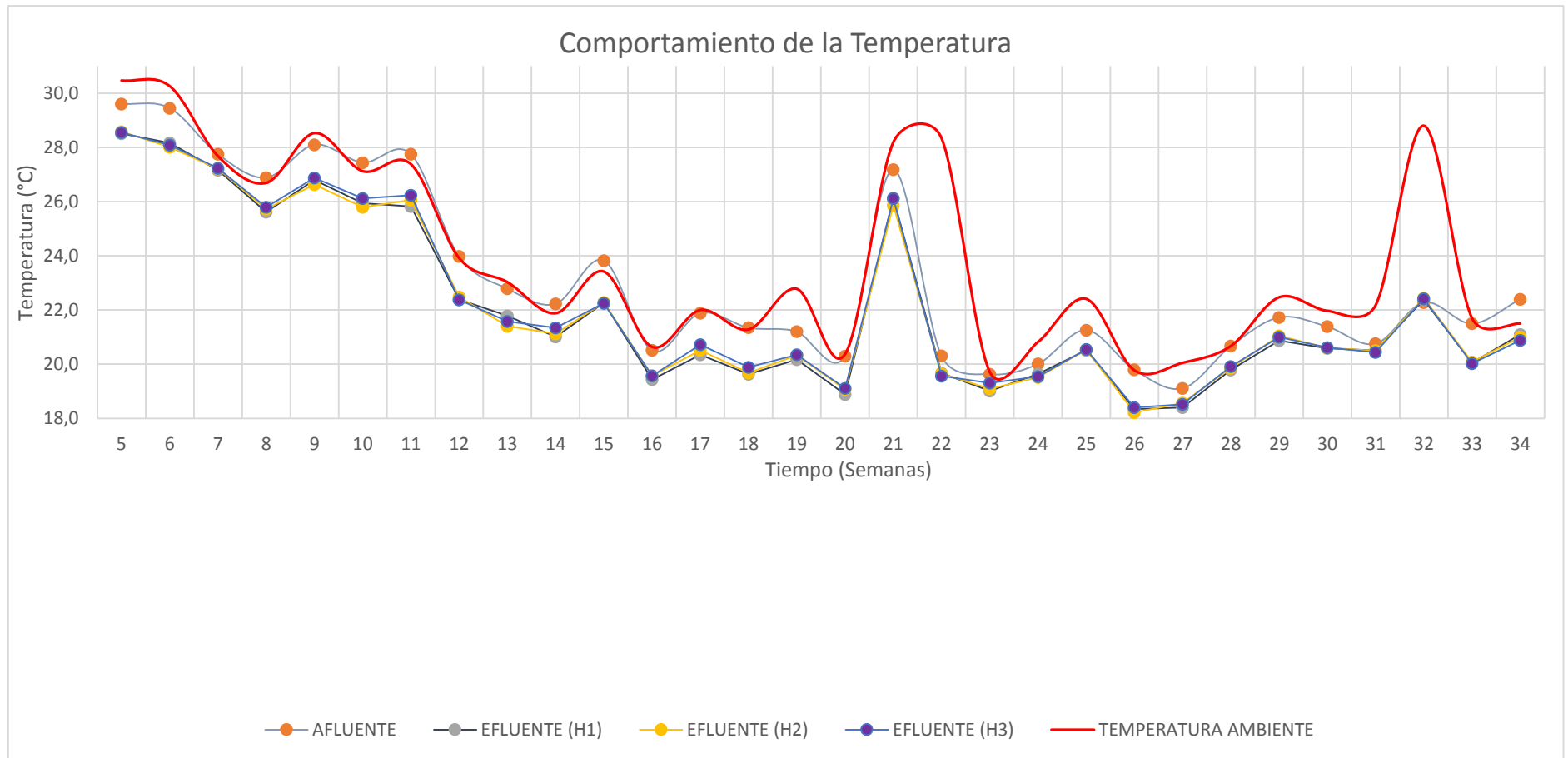


Figura 31. Gráfico de líneas de la Variación de la Temperatura Vs. Tiempo

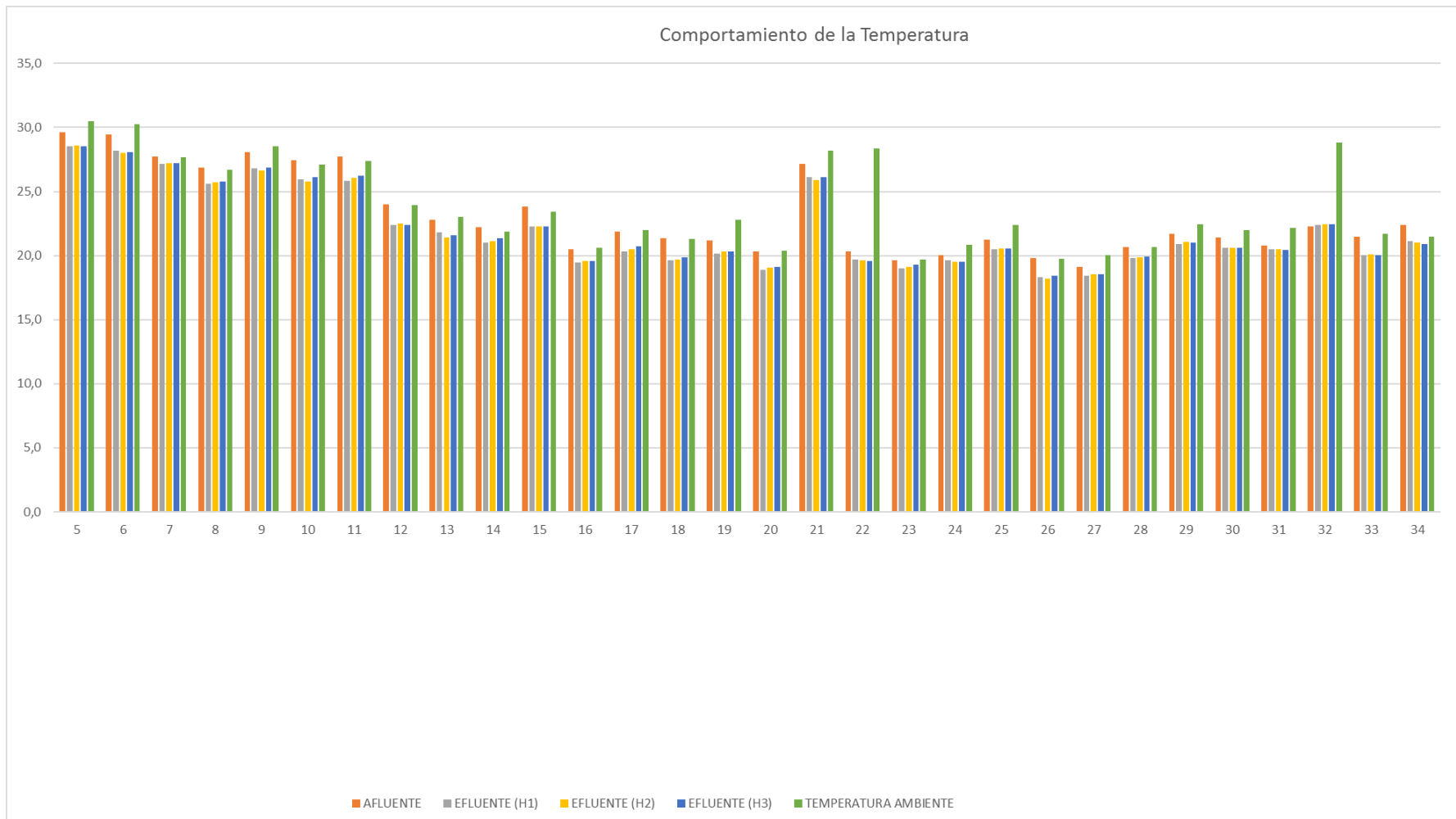


Figura 32. Gráfico de Barras de la Variación de la Temperatura Vs. Tiempo

En la figura 32 se observa que el afluente ingresa con una temperatura aproximadamente un grado mayor que los efluentes. Esto indica que los humedales tienen la propiedad de absorber el calor del agua. Además, la temperatura de los efluentes de los tres humedales son prácticamente las mismas.

6.12 Análisis de la variación de la Conductividad Eléctrica

Los valores de conductividad se midieron en el afluente y afluentes dos veces al día (09:00 hrs y 15:00hrs); de esta manera se fueron realizando de manera diaria por un periodo de 30 semanas, desde la semana 5 hasta la semana 34. En la Tabla 36, se presentan los valores obtenidos de realizar las mediciones de conductividad, de forma semanal.

Tabla 36 – Variación de la Conductividad Eléctrica

TIEMPO		CONDUCTIVIDAD (us/cm)			
PERIODO	SEMANA	AFLUENTE	EFLUENTE (H ₁)	EFLUENTE (H ₂)	EFLUENTE (H ₃)
ARR 01	5	1073,3	872,2	1785,6	1232,8
ARR 01	6	1328,1	1171,3	1626,0	1134,2
ARR 01	7	1520,2	1268,9	1444,7	1309,8
ARR 01	8	1361,3	1109,8	1502,3	1213,7
ARR 01	9	1334,0	1202,5	1502,1	1191,1
ARR 01	10	1334,1	1104,2	1545,0	1200,1
ARR 02	11	1335,5	1075,0	1492,8	1118,0
ARR 02	12	1380,2	1435,1	1324,1	1314,5
ARR 02	13	1492,3	1384,3	1415,5	1357,5
ARR 02	14	1557,3	1491,2	1468,4	1223,4
ARR 02	15	1473,6	1455,7	1449,6	1167,5
ARR 02	16	1608,4	1495,5	1473,5	1445,8
ARR 03	17	1535,8	1488,4	1488,3	1245,3
ARR 03	18	1402,6	1465,2	1478,7	1137,3
ARR 03	19	1402,4	1419,9	1426,0	1184,3
ARR 03	20	1533,7	1505,6	1517,8	1215,5
ARR 03	21	1250,1	1373,0	1481,8	1248,2
ARR 03	22	1546,1	1426,5	1397,2	1109,9
Fase Exp	23	1391,7	1298,1	1415,7	1123,5

Fase Exp	24	1242,2	1258,8	1281,2	1031,8
Fase Exp	25	1233,8	1244,3	1289,8	1039,5
Fase Exp	26	1272,3	1250,1	1286,4	1206,6
Fase Exp	27	1313,4	1099,8	1243,0	1141,6
Fase Exp	28	1205,7	1152,3	1135,2	887,3
Fase Exp	29	1166,2	1137,9	1197,5	898,7
Fase Exp	30	1110,6	1119,4	1116,0	885,8
Fase Exp	31	1153,4	1157,4	1145,1	892,7
Fase Exp	32	1191,8	1177,3	1181,6	862,3
Fase Exp	33	1184,1	1189,0	1207,6	896,4
Fase Exp	34	1251,0	1218,0	1202,0	978,0

Dónde: ARR. <> Arranque; Fase Exp <> Fase Experimental; H₁ <> Humedal 1; H₂ <> Humedal 2; H₃ <> Humedal 3

Tabla 37 – Resumen de la Variación de la Conductividad Eléctrica

TIE MPO	Conductividad Máxima Afluente				Conductividad Mínima Afluente				Conductividad Promedio			
	AFLU ENTE	EFLU ENTE (H ₁)	EFLU ENTE (H ₂)	EFLU ENTE (H ₃)	AFLU ENTE	EFLU ENTE (H ₁)	EFLU ENTE (H ₂)	EFLU ENTE (H ₃)	AFLU ENTE	EFLU ENTE (H ₁)	EFLU ENTE (H ₂)	EFLU ENTE (H ₃)
ARR 01	1520,2	1268,9	1444,7	1309,8	1073,3	872,2	1785,6	1232,8	1325,2	1121,5	1567,6	1213,6
ARR 02	1608,4	1495,5	1473,5	1445,8	1335,5	1075,0	1492,8	1118,0	1474,5	1389,5	1437,3	1271,1
ARR 03	1546,1	1426,5	1397,2	1109,9	1250,1	1373,0	1481,8	1248,2	1445,1	1446,4	1465,0	1190,1
Fase Exp	1391,7	1298,1	1415,7	1123,5	1110,6	1119,4	1116,0	885,8	1226,3	1191,9	1225,1	987,0

En la figura 33, se muestra el comportamiento de las variaciones de conductividad eléctrica a lo largo del periodo de experimentación.

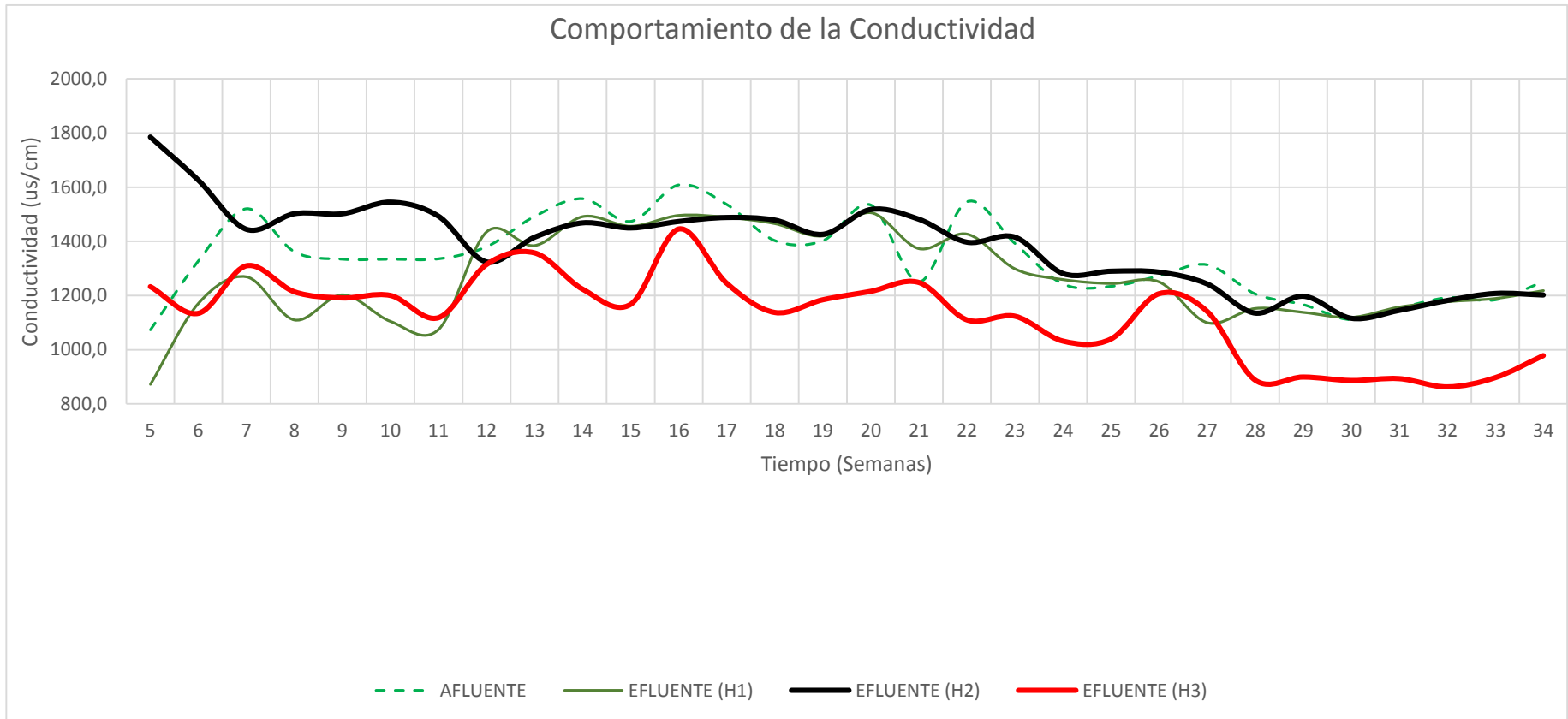


Figura 33. Variación de la Conductividad Eléctrica

Del gráfico anterior se observa que la estabilización del parámetro conductividad tuvo una duración de siete semanas y a partir de ahí en adelante fue estable tanto para el afluente como para el efluente de los tres humedales (**H₁**, **H₂** y **H₃**).

De los valores de la tabla de resultados de conductividad, se puede observar que los valores más altos provienen del efluente del humedal **H₂**.

6.13 Análisis de la variación Oxígeno Disuelto

Las mediciones de oxígeno disuelto se realizaban dos veces al día (09:00hrs y 15:00hrs), este proceso se realizó de manera diaria durante 30 semanas. A continuación, se presenta la tabla de resultados de OD, tanto para el afluente como para el efluente de los humedales **H₁** y **H₂**. Para el efluente del humedal **H₃** se realizó un proceso distinto de medición, el cual se detallará más adelante.

PERIODO DE ARRANQUE**Tabla 38 – Consumo del Oxígeno Disuelto**

TIEMPO		OÍD. (mg/l)		
PERIODO	SEMANA	AFLUENTE	EFLUENTE (H ₁)	EFLUENTE (H ₂)
ARRE 01	5	0,2	4,7	1,0
ARRE 01	6	0,1	2,9	1,1
ARR 01	7	0,1	4,6	1,6
ARR 01	8	0,3	2,6	2,2
ARR 01	9	0,4	2,9	1,9
ARR 01	10	0,5	3,6	2,0
ARR 02	11	0,4	2,0	1,2
ARR 02	12	0,5	4,6	3,0
ARR 02	13	0,4	3,8	3,3
ARR 02	14	0,2	4,4	3,3
ARR 02	15	0,2	4,2	3,9
ARR 02	16	0,2	5,1	4,3
ARR 03	17	0,2	3,6	2,5
ARR 03	18	0,2	5,0	4,2
ARR 03	19	1,0	0,6	2,4
ARR 03	20	0,1	0,3	2,7
ARR 03	21	0,9	1,0	3,5
ARR 03	22	0,2	0,4	2,9
Fase Exp	23	0,3	0,6	2,8
Fase Exp	24	0,5	0,7	2,8
Fase Exp	25	0,4	1,0	3,0
Fase Exp	26	0,3	0,4	2,4
Fase Exp	27	0,6	0,6	2,7
Fase Exp	28	0,4	1,6	3,2
Fase Exp	29	0,3	1,2	3,5
Fase Exp	30	0,2	1,2	3,1
Fase Exp	31	0,2	1,1	3,0
Fase Exp	32	0,2	1,8	4,2
Fase Exp	33	0,2	1,8	3,0
Fase Exp	34	0,1	2,4	3,0

Dónde: ARR. <> Arranque; Fase Exp <> Fase Experimental; H₁ <> Humedal 1; H₂ <> Humedal 2

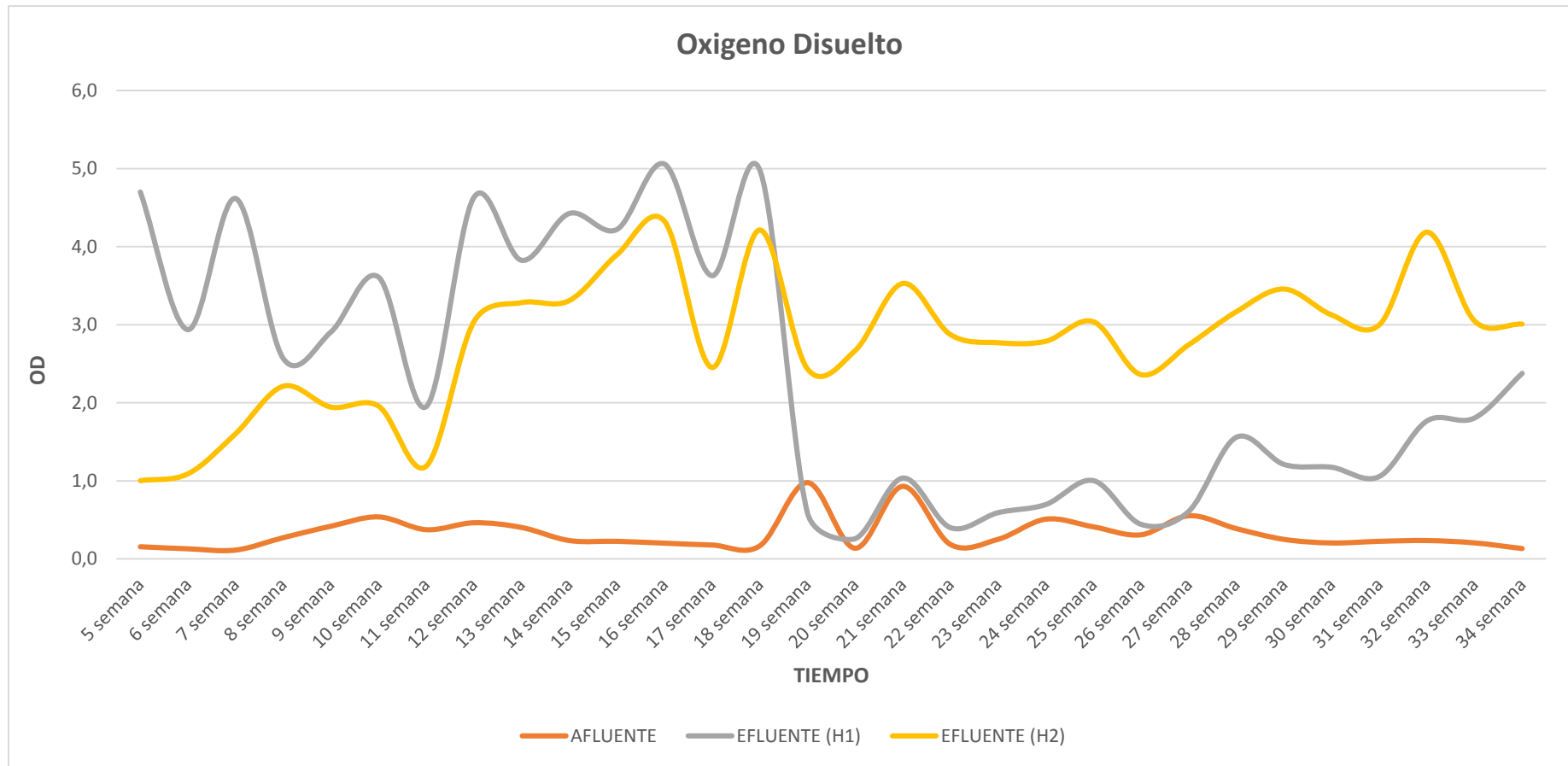


Figura 34. Variación del oxígeno disuelto

En la Figura 34 se observa que el afluente casi no tiene O.D. debido a que proviene del UASB. El poco Oxígeno que logra tener sería producto de la agitación mecánica que realiza el mezclador del tanque de ecualización. Por otro lado se evidencia que el efluente del H₁ presenta mucho más O.D. que el efluente del H₂ debido a sus raíces más grandes. Esto se da hasta que se cortan los juncos en la semana 18, que es cuando se aprecia que el O.D. del efluente del H₁ se reduce considerablemente.

HUMEDALES 1

Tabla 39 – Humedal 01 (Antiguo)

	Tramo 01	Tramo 02	Tramo 03
06/05/2016	0,24	0,28	0,30
13/05/2016	0,24	0,26	0,29
17/06/2016	0,27	0,30	0,33
23/06/2016	0,28	0,33	0,39
27/07/2016	0,04	0,06	0,07
05/08/2016	0,03	0,07	0,11

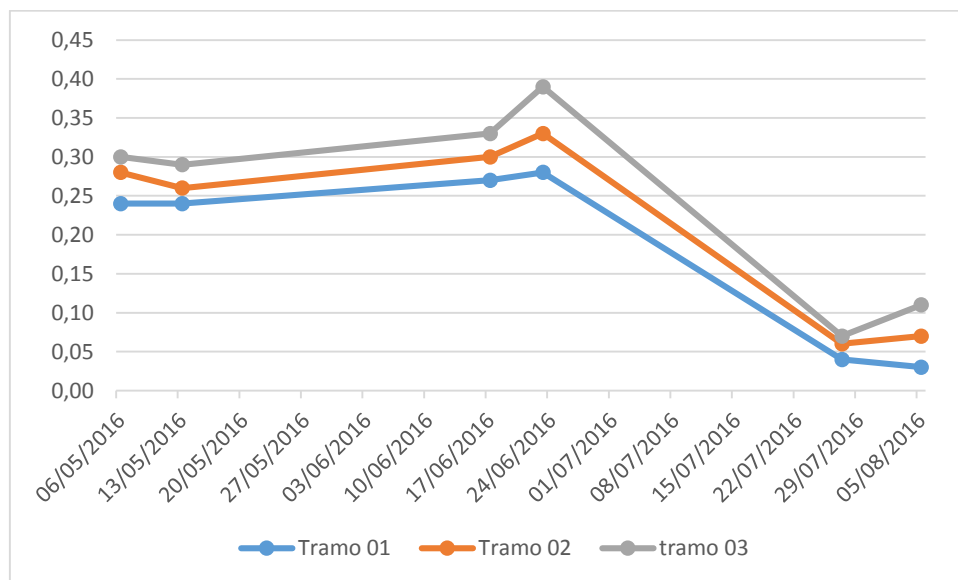
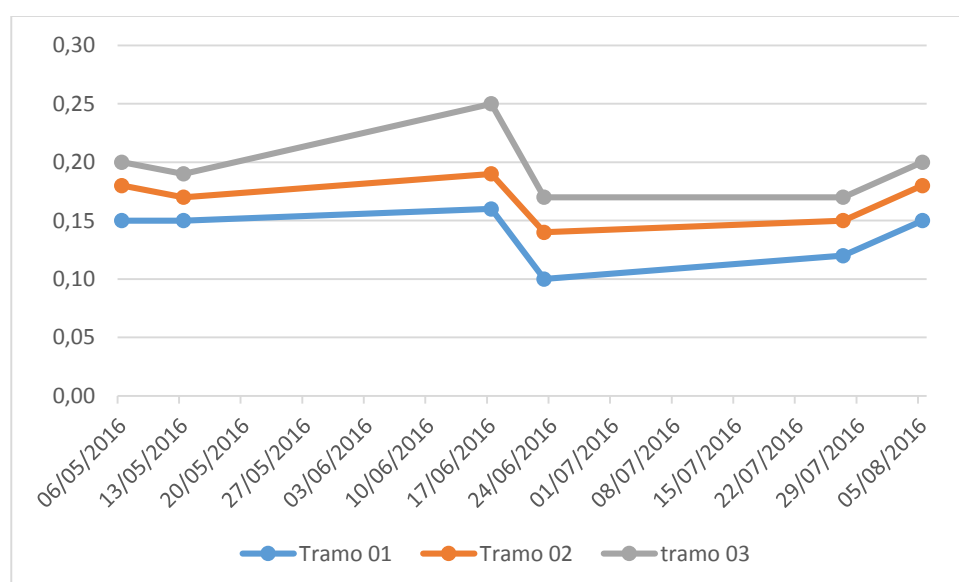


Figura 35. Variación del Oxígeno Disuelto en el tiempo por tramo en el Humedal 1

HUMEDAL 2**Tabla 40 – Humedal 2 (Nuevo)**

	Tramo 01	Tramo 02	Tramo 03
06/05/2016	0,15	0,18	0,20
13/05/2016	0,15	0,17	0,19
17/06/2016	0,16	0,19	0,25
23/06/2016	0,10	0,14	0,17
27/07/2016	0,12	0,15	0,17
05/08/2016	0,15	0,18	0,20

**Figura 36. Variación del Oxígeno Disuelto en el tiempo por tramo en el Humedal 2**

Se observa que tanto en el humedal nuevo como en el antiguo, el valor de O.D. aumenta conforme aumenta la distancia desde la entrada. Se cree que este fenómeno puede deberse a dos cosas: 1) que el agua residual va perdiendo DBO en el camino y 2) El área de oxigenación por las raíces va aumentando conforme aumenta el recorrido. Asimismo, observamos que el humedal antiguo presentaba más oxigenación que el nuevo hasta la semana 18, que fue el día en que se murieron las macrofitas debido a una poda excesiva. Luego de ese día el O.D. se redujo considerablemente, y solo se pudo recuperar hasta el final de la investigación.

HUMEDAL 3

La evaluación se hizo para tres condiciones de aireación distintas. Las cuales se detallan a continuación.

Condición 1

La condición 1 consistió en mantener las condiciones de aireación especificadas en la Tabla 41, realizando mediciones durante todo el día con intervalos de media hora.

Tabla 41 – Humedal 3 – Condición 1

Estado de la bomba	ON	OFF
Ciclo de aireación (Hr):	6	6

Existe desperdicio de energía en la aireación debido a que después de estabilizada la MO., ésta aún continúa, llegando incluso a valores de saturación (10,34 mg/l). Por otro lado, el tiempo de no aireación también es muy largo, generando anaerobiosis por tiempos prolongados. Es difícil que, en estas condiciones tan cambiantes, las bacterias responsables de la Nitrificación - Desnitrificación puedan adaptarse, y en general cualquier tipo de bacteria responsable de la degradación de la M.O. Esto puede verificarse en el hecho que las curvas no son curvas suaves. También, se pudo comprobar que las plantas en el humedal 03 se encontraban muy débiles. Ya que estas eran atacadas por bichos y no se observaba crecimiento. Se cree que esto podría deberse al elevado nivel de nitritos encontrados, que estaría generando toxicidad en el agua, o a que las condiciones cambiantes no generan un buen hábitat para ellas. Esta situación contrasta a lo ocurrido con las plantas de los humedales 1 y 2 que alcanzaron tamaños superiores a los 2 m. Asimismo, se cree que hay pocas bacterias nitrificantes debido al largo periodo sin oxígeno en la no aireación y a la estabilización de la MO. en el largo periodo de aireación, Por lo tanto, es muy probable que solo haya presencia de bacterias facultativas. Esto también podría evidenciarse con la limitada respiración bacteriana que muestra la curva NO suave

Tabla 42. Oxígeno Disuelto Viernes 06/05/2016

O.D.	8:00	8:30	9:00	9:30	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00	13:30	14:00	14:30	15:00	15:30	16:00	16:30	17:00	17:30
Tramo 1	0,01	0,01	0,02	2,05	5,24	8,01	8,96	9,23	9,14	9,56	9,47	9,69	9,58	9,86	9,91	2,83	0,61	0,26	0,06	0,02
Tramo 2	0,02	0,01	0,01	3,16	4,89	8,33	9,04	9,1	9,46	9,73	9,77	9,86	9,94	10,06	10,13	3,27	0,97	0,46	0,17	0,05
Tramo 3	0,02	0,02	0,01	3,87	6,01	8,77	9,16	9,44	9,7	9,98	10,23	10,18	10,32	10,27	10,34	5,11	1,96	0,74	0,35	0,14

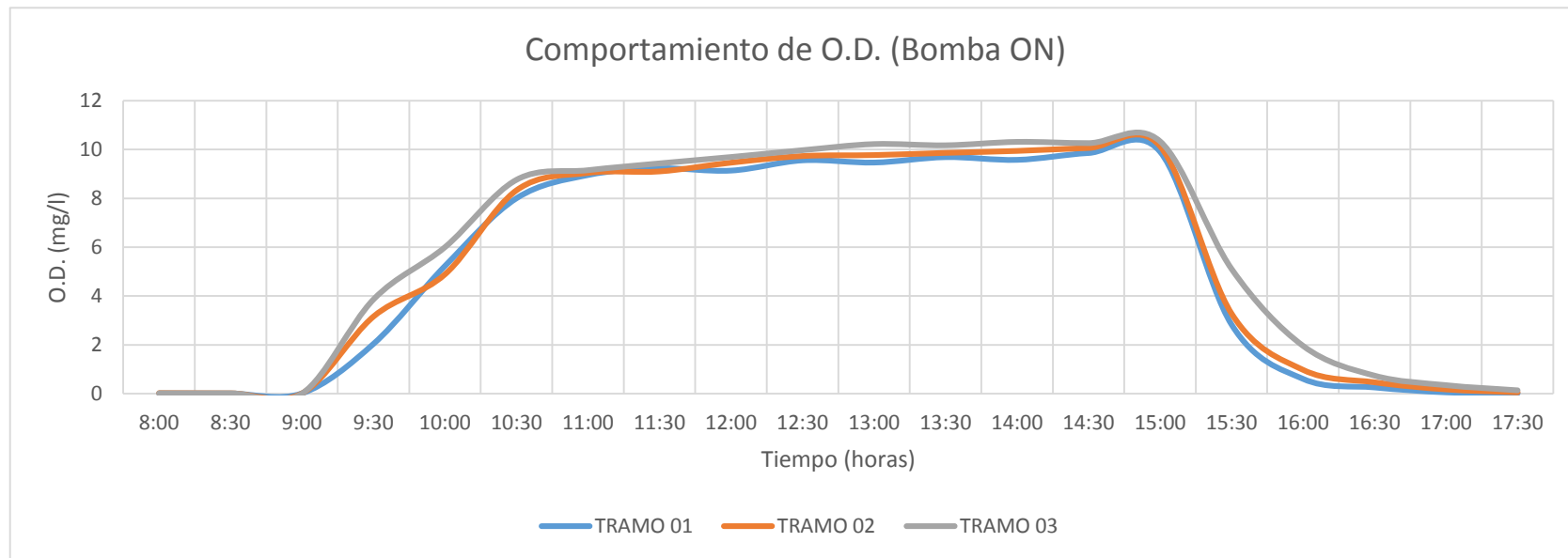


Figura 37. Oxígeno disuelto en el Humedal 3 bajo la condición 1 en los tres tramos

Tabla 43. Oxígeno Disuelto Viernes 13/05/2016

O.D.	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
Tramo 1	9,83	10,04	0,56	0,09	0,01	0,01	0,01	0,01	3,29	8,12	9,35
Tramo 2	10,26	10,32	0,94	0,25	0,03	0,01	0,01	0,01	4,77	8,86	9,71
Tramo 3	10,32	10,46	1,44	0,69	0,11	0,02	0,02	0,01	5,82	9,42	10,05

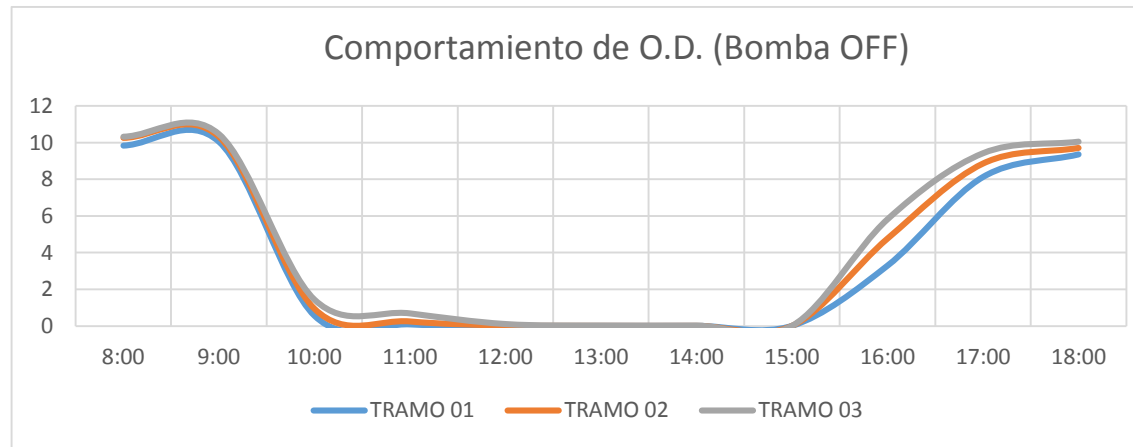


Figura 38. Oxígeno disuelto en el Humedal 3 bajo la condición 1 en los tres tramos

Condición 2

La condición 2 consistió en mantener las condiciones de aireación especificadas en la Tabla 40, realizando mediciones durante todo el día con intervalos de media hora.

Tabla 44. Humedal 3 – Condición

Estado de la bomba	ON	OFF
Ciclo de aireación (Hr):	3	3

Los resultados se muestran a continuación

Tabla 45 – Oxígeno Disuelto Viernes 17/06/2016

O.D.	8:00	8:30	9:00	9:30	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00	13:30
Tramo 1	0,78	0,33	0,24	1,12	2,71	4,63	6,23	7,34	7,68	3,73	1,97	1,04
Tramo 2	1,95	1,27	1,29	2,08	4,82	6,28	7,36	7,99	8,26	5,41	3,56	2,12
Tramo 3	3,45	3,01	2,42	4,57	7,07	7,85	8,43	8,82	8,97	6,56	4,32	3,26

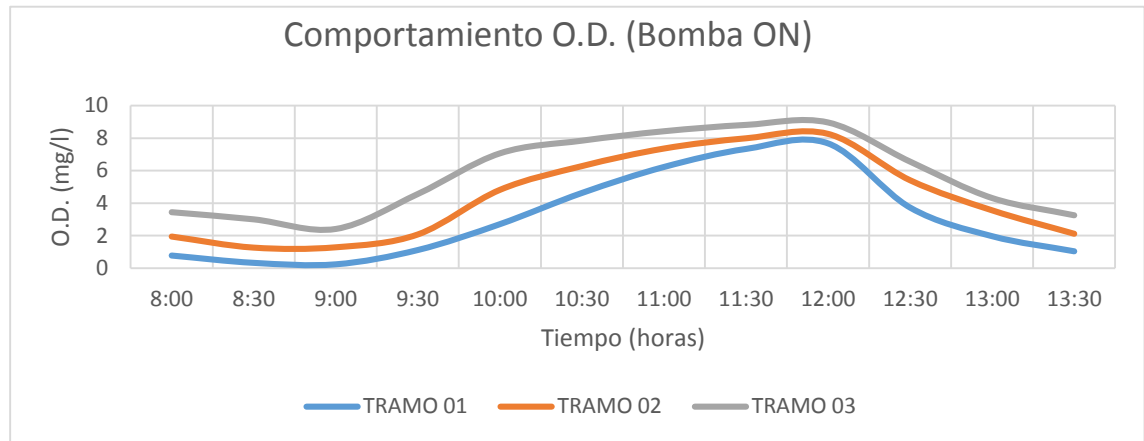


Figura 39. Oxígeno disuelto en el Humedal 3 bajo la condición 2 en los tres tramos

Las curvas se han suavizado mucho más, Se cree que esto puede deberse a la reducción del tiempo de los intervalos. Se aprecia que durante la aireación la curva sube suave, sobretodo la curva 1A que corresponde al tramo que está más cerca a la entrada. Esto podría indicar que, si se le aumenta la carga orgánica en el afluente o se le disminuye la intensidad de aireación, se podría llegar a la máxima eficiencia. Esto sería evidenciable verificando si se llega a formar una curva suave que estaría indicando que hay más bacterias respirando. De igual manera, se aprecia que durante la aireación el OD sigue siendo muy alto, lo cual es un desperdicio de energía. Para solucionar este problema se hizo lo siguiente:

1. Aumentar la carga orgánica del afluente
2. Bajar la intensidad de aireación
3. Disminuir el tiempo de aireación.

Como queremos iguales condiciones, seguiremos jugando con los tiempos y dejaremos la misma intensidad de aireación y la misma carga orgánica. Por otro lado, durante la no aireación, inicialmente la curva baja más pronunciadamente y luego se suaviza, esto se debe a que el oxígeno se libera al ambiente rápidamente ya que el agua supera su estado de saturación. Este fenómeno se produce también más adelante.

Condición 3

Esta condición fue la última a la que se sometió al humedal. Y al ver que aún había condiciones de saturación de oxígeno. Se optó por disminuir aún más el tiempo de aireación, de acuerdo a los datos de la Tabla 46.

Tabla 46 - Humedal 3 – Condición 3

Estado de la bomba	ON	OFF
Ciclo de aireación (Hr):	2	4

Tabla 47 – Oxígeno Disuelto Miércoles 27/072016

O.D.	8:00	8:30	9:00	9:30	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00	13:30
Tramo 1	0,4	0,31	0,24	0,17	1,15	1,84	2,52	2,59	0,95	0,76	0,69	0,41
Tramo 2	1,32	1,09	0,91	0,85	2,18	3,15	3,47	3,82	2,11	1,78	1,56	1,13
Tramo 3	2,43	2,16	1,73	1,59	3,31	4,21	4,99	5,23	3,22	2,41	2,19	1,84

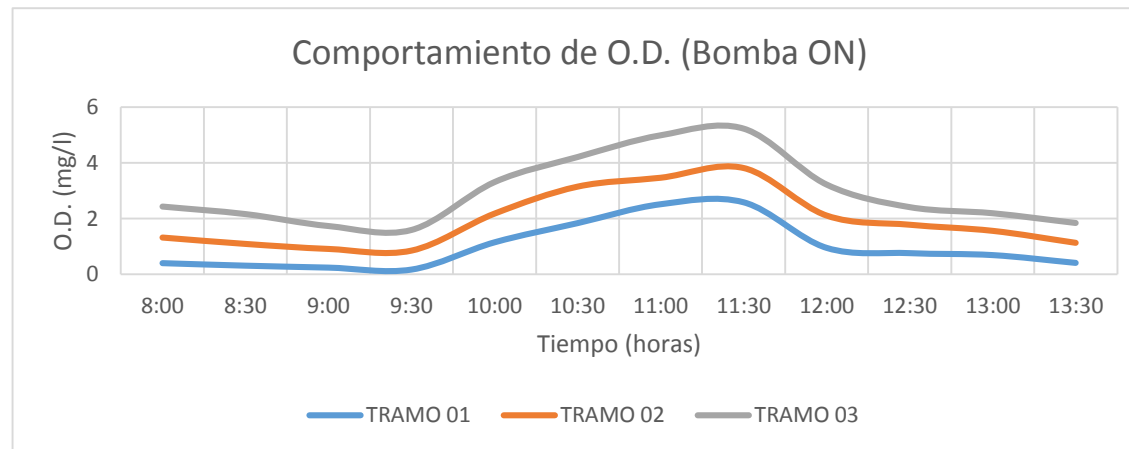


Figura 40. Oxígeno disuelto en el Humedal 3 bajo la condición 3 en los tres tramos

Tabla 48 – Oxígeno Disuelto Miércoles 05/08/2016

O.D.	8:00	8:30	9:00	9:30	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00	13:30
1A	2,19	2,55	1,35	1,12	0,91	0,75	0,44	0,35	0,24	0,16	0,83	1,54
2A	3,62	4,26	2,64	2,06	1,84	1,58	1,32	1,13	0,92	0,68	1,89	3,27
3A	5,17	5,64	3,97	3,46	3,05	2,86	2,57	2,18	1,83	1,44	2,92	4,23

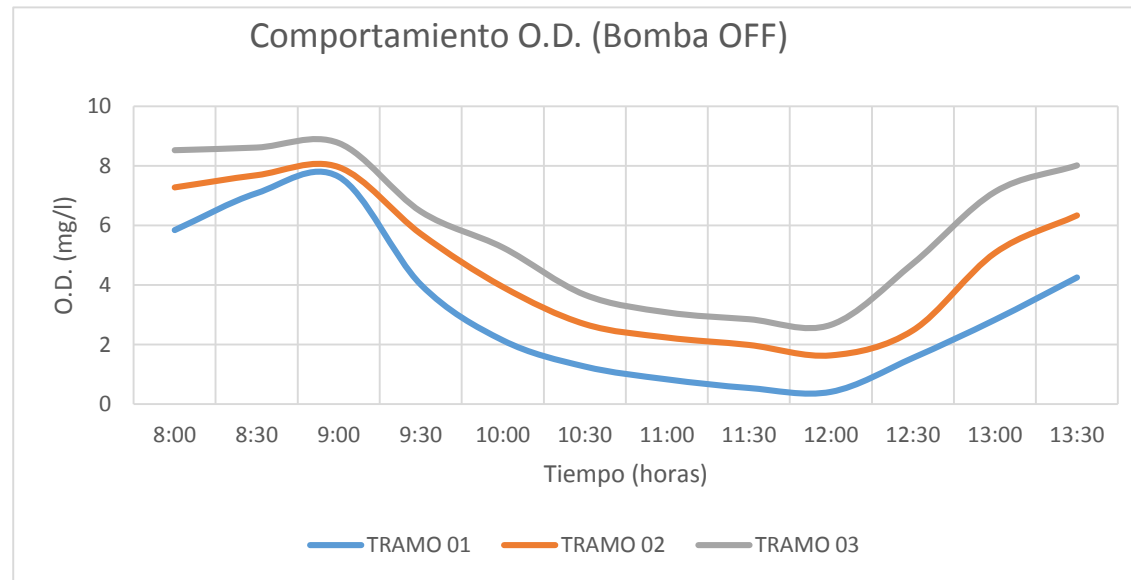


Figura 41. Oxígeno disuelto en el Humedal 3 bajo la condición 3 en los tres tramos

En las figuras 40 y 41 se observa que el tiempo de No Aireación es muy largo comparado con el tiempo de aireación. Esto podría hacer pensar que el tiempo excesivo de No aireación en realidad es un ahorro de energía. No obstante, se piensa que esto resultaría en un desperdicio del reactor, puesto que es muy probable que no se produzca remoción de nutrientes durante este periodo. Al parecer la mejor opción sería que los intervalos de aireación y no aireación sean iguales, pero con periodos más cortos para poder controlar mejor los rangos de aireación y no aireación. Por otro lado, quizás las bacterias necesiten más tiempo para realizar la desnitrificación que para realizar la nitrificación, y puede que un periodo largo de no aireación contribuya a una mejor remoción de nutrientes. Se recomienda probar con un intervalo de aireación de 1 hr on y 1.5 hr off para futuras investigaciones.

CAPITULO VII DISCUSIÓN DE RESULTADOS

7.1 Discusión de Resultados

Respecto al humedal antiguo podemos decir lo siguiente:

Durante el arranque del sistema (06 semanas) y las subsecuentes 07 semanas de fase experimental, el humedal **H₁** (humedal antiguo) siempre tuvo mejores eficiencias en remoción de nitrógeno que el humedal **H₂** (blanco): Las eficiencias de remoción de Nitrógeno Total en promedio fueron, en **H₁** (18.34%) y en **H₂** (8.30%); asimismo, las eficiencias de remoción de Nitrógeno Amoniacal en promedio fueron, en **H₁** (12.46%) y en **H₂** (2.80%). Siendo así se ratifica la tesis de que un humedal más antiguo tendrá mayor eficiencia removiendo nitrógeno del AR que un humedal joven. Por otro lado, en el efluente de H1 y H2 se evidencia que no se forma nitrato, y la presencia de nitritos es baja, por lo cual se puede concluir que, en ambos humedales, la nitrificación es incompleta o nula. Esto se debe a los bajos niveles de O.D. en ambos humedales. De esto se concluye que, la mayor remoción de nitrógeno del humedal antiguo se debe a la asimilación de las macrófitas, que en el caso del humedal H1 eran más robustas que el humedal H2, siendo despreciable el proceso de nitrificación y desnitrificación para este caso.

Además, como ya se explicó antes, en la semana N° 18 de la presente investigación, accidentalmente se podó excesivamente los juncos del humedal H1 produciendo su muerte. Inmediatamente después del hecho, se removieron los juncos muertos y se trasplantaron nuevos juncos, sin embargo, durante las semanas subsecuentes la eficiencia de remoción del humedal disminuyó drásticamente en todos sus parámetros, sin poder volver a recuperarse en su totalidad durante el tiempo que duró la investigación. Con esto se logró comprobar que, la eficiencia de remoción del humedal H1 se debió a que sus juncos eran más robustos y sus raíces más grandes, lo cual favoreció a una mayor oxigenación en el humedal y la proliferación de un consorcio de microorganismos más eficientes en la remoción de nitrógeno y demás parámetros. Asimismo, la eficiencia del humedal H2 fue aumentando progresivamente conforme crecían sus macrófitas, llegando a tener resultados casi tan buenos como los de H1 (antes de la semana 18) en la remoción de Nitrógeno y alcanzando valores similares de O.D. durante las últimas semanas de evaluación.

Respecto al humedal con aireación intermitente podemos decir lo siguiente:

Se evaluará la influencia de los periodos de aireación y no aireación, así como también la influencia de la concentración de Nitrógeno del afluente en la eficiencia del humedal respecto a su capacidad de remover nitrógeno.

a) Respecto a la influencia de los periodos de aireación y no aireación:

El humedal H3 (aireación intermitente) es quien presenta la mejor eficiencia de remoción de Nitrógeno Total y Nitrógeno Amoniacal en toda la etapa experimental, respecto a los humedales H1 y H2 (blanco).

Para este humedal, se evaluaron 03 periodos distintos de aireación y no aireación, los cuales corresponden a 03 fases, como veremos a continuación:

En la primera fase (06 semanas) se utilizó un periodo de aireación de 6 horas ON y 6 horas OFF, donde las curvas de O.D. vs Tiempo muestran que no se alcanzó la estabilización del sistema, además fue la fase que tuvo la menor eficiencia en remoción de nitrógeno para el humedal H3: Las eficiencias de remoción de Nitrógeno Total en promedio fueron, en **H₃** (24.74%) y en **H₂** (7.18%); asimismo, las eficiencias de remoción de Nitrógeno Amoniacal en promedio fueron, en **H₃** (86.26%) y en **H₂** (2.78%).

Asimismo, se produjo una gran formación de Nitrito (en promedio 19.5 mg/l) lo cual evidencia una nitrificación incompleta y se manifestó originando toxicidad en el agua que atacó a las macrófitas retardando su crecimiento y enfermándolas.

Además, se produjo una formación moderada de Nitrato (en promedio 16.5 mg/l), lo cual indica que se realizó una buena desnitrificación debido a los largos periodos sin suministro de O.D. lo cual permitió alcanzar niveles anóxicos en el humedal, y a la disponibilidad de carga orgánica durante esos periodos.

En la segunda fase (06 semanas) se utilizó un periodo de aireación de 3 horas ON y 3 horas OFF, donde las curvas de O.D. vs Tiempo muestran una curva más suave, lo cual muestra que si se alcanzó la estabilización del sistema, además en esta fase se mejoró la eficiencia en remoción de nitrógeno para el humedal H3: Las eficiencias de remoción de Nitrógeno Total en promedio fueron, en **H₃** (36.26%) y en **H₂** (9,42%); asimismo, las eficiencias de remoción de Nitrógeno Amoniacal en promedio fueron, en **H₃** (88.80%) y en **H₂** (2.81%).

Asimismo, la formación de Nitrito se redujo bastante (en promedio fue 2.5 mg/l) lo cual evidencia una buena nitrificación y se manifestó originando que los juncos comiencen a fortalecerse y a crecer con normalidad.

Sin embargo, se produjo una formación alta de Nitrato (en promedio 32.0 mg/l), lo cual indica que no se realizó una buena desnitrificación debido a los cortos periodos de no aireación y a la estabilización de carga orgánica debido a una elevada concentración de O.D. durante los periodos de aireación.

En la tercera fase (06 semanas) se utilizó un periodo de aireación de 2 horas ON y 4 horas OFF, donde las curvas de O.D. vs Tiempo muestran una curva aún más suave, lo cual muestra que se alcanzó una mejor estabilización del sistema, además en esta fase se obtuvo la mayor eficiencia en remoción de nitrógeno para el humedal H3: Las eficiencias de remoción de Nitrógeno Total en promedio fueron, en **H₃** (45.86%) y en **H₂** (11.74%); asimismo, las eficiencias de remoción de Nitrógeno Amoniacal en promedio fueron, en **H₃** (98.18%) y en **H₂** (5.45%).

Asimismo, la formación de Nitrito se redujo aún más (en promedio fue 0.5 mg/l) lo cual, junto con la casi perfecta eficiencia de remoción de Nitrógeno Amoniacal, evidencia una nitrificación completa.

Sin embargo, se produjo una formación alta de Nitrato (en promedio 31.0 mg/l), lo cual indica que no se realizó una buena desnitrificación debido a los aún cortos periodos de no aireación y a estabilización de carga orgánica debido a una elevada concentración de O.D. durante los periodos de aireación.

Obtenidos estos resultados se eligió el mejor periodo de aireación y no aireación para proceder con la fase experimental del proyecto.

La fase experimental tuvo una duración de 12 Semanas, donde se encontró un valor promedio de Nitrógeno Total de 44 mg/l en el afluente, mientras que en el efluente de **H₂** fue de 37 mg/l, y en **H₃** fue de 24 mg/l, teniendo en promedio una eficiencia de 46.92%. De igual modo, el valor promedio del Nitrógeno Amoniacal en el afluente fue de 38 mg/l, mientras que en el efluente de **H₂** fue de 32 mg/l, y en **H₃** fue de 4 mg/l, teniendo en promedio una eficiencia de 91.02%. Se concluyó que la eficiencia de **H₃** para remover Nitrógeno es mucho mayor a la de **H₂**, debido a que se estaría produciendo el proceso de Nitrificación y Desnitrificación en **H₃** a causa de la aireación intermitente.

Asimismo, la formación de Nitrito fue despreciable, lo cual, junto con alta eficiencia de remoción de Nitrógeno Amoniacal, evidencia una nitrificación completa.

Sin embargo, se produjo una formación alta de Nitrato (en promedio 28.0 mg/l), lo cual indica que no se realizó una buena desnitrificación debido a los cortos periodos de no aireación y a la estabilización de carga orgánica debido a una elevada concentración de O.D. durante los periodos de aireación.

De esto se concluye que los mejores resultados en remoción de nitrógeno se dieron con el intervalo de aireación y no aireación de 2 horas ON y 4 horas OFF, llegando a remover en promedio un 47.54% de nitrógeno total del agua residual, evidenciándose un buen proceso de nitrificación, pero un no muy buen proceso de desnitrificación.

Se cree que el intervalo de aireación y no aireación se puede mejorar aún más en sistemas más grandes y con mayores TRH, ya que, en humedales a escala de laboratorio es muy difícil controlar la cantidad de O.D. que se suministra debido al poco volumen de agua que hay en el humedal, lo cual se evidencia con los altos niveles de O.D. en el AR durante el periodo de aireación y no aireación. Esta afirmación se corrobora con los buenos resultados obtenidos en la investigación de Eric Redmond, en su tesis titulada: “Nitrogen removal from wastewater by an aerated subsurface flow constructed humedal” o “Remoción de Nitrógeno del agua residual mediante un humedal artificial aireado de flujo sub-superficial”, en la cual se evaluó un humedal con un TRH de 4 días (04 veces mayor al TRH de H3), con un periodo de aireación intermitente de 06 hrs ON y 6hrs OFF, en un clima frío (2°C), con dimensiones de 2.5 m x 2.5 m x 0.60 m (05 veces mayor a H3). Este humedal mostró una eficiencia de remoción de Nitrógeno Amoniacal de hasta 95%, y concentraciones de O.D. entre el rango de 0.1 a 2.5 mg/l.

Otra alternativa para poder mejorar el proceso de nitrificación y desnitrificación sería utilizar 02 humedales en serie, uno con aireación constante y otro sin aireación, tal como lo hizo Ventura C. (2014) en su tesis titulada “Implementación de Humedales para mejorar la eficiencia de la planta de tratamiento de aguas residuales provenientes de la industria procesadora agropecuaria Esmeralda S.A” en el cual se implementó dos unidades de humedales de flujo horizontal en serie (Humedal aireado + humedal sin aireación), donde alcanzó una máxima eficiencia de 88.53% en remoción de Nitrógeno total. Sin embargo, cabe señalar que el requerimiento de aireación para este sistema sería 03 veces mayor al requerimiento de esta investigación, y el costo de inversión inicial y área requerida se duplicarían.

b) Respecto a la influencia de la concentración de Nitrógeno en el afluente:

En el humedal H3: la remoción de Nitrógeno es mayor cuando hay altas concentraciones de Nitrógeno en el afluente. Por otro lado, también se puede observar que cuando hay bajas concentraciones de nitrógeno en la entrada, la eficiencia de remoción de nitrógeno del humedal **H₃** disminuye. De esto se puede afirmar que es conveniente usar la aireación intermitente para aguas con altas concentraciones de nitrógeno total, como es el caso de las aguas residuales industriales provenientes de industrias como camales, pesqueras, curtiembres, agropecuarias, etc.

Se puede afirmar que la alta concentración de nitrógeno en el afluente aumenta la eficiencia de remoción de nitrógeno en un humedal con aireación intermitente solo hasta cierto límite, ya que, según los resultados de Huataquispe M. & Segura D. (2011), en su tesis titulada “Evaluación comparativa del tratamiento secundario de aguas residuales de un matadero mediante el uso de un lecho horizontal con Aireación artificial y presencia de plantas con respecto a un lecho Horizontal con aireación artificial sin presencia de plantas”, sus resultados mostraron que la eficiencia del humedal con aireación, en cuanto al parámetro nitrógeno como nitratos, nitritos y nitrógeno amoniacal, mostraron que la nitrificación en ambos lechos es incompleta debido a la alta carga de nitrógeno que ambos lechos reciben. Es así que se concluye que, cuanto mayor es la carga de Nitrógeno del afluente, mayor deberá ser el suministro de aire para que el sistema trabaje adecuadamente.

CAPITULO VIII CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 Conclusiones

- La aplicación de O.D. de manera mecánica a un humedal artificial en intervalos cortos de aireación y no aireación generó las condiciones necesarias para que se produzca el proceso de nitrificación y desnitrificación, tal como ocurrió en el humedal con aireación intermitente (**H₃**), donde se obtuvo las eficiencias más altas en remoción de nitrógeno.
- La antigüedad de un humedal no es un factor que determine directamente su capacidad de remover nitrógeno, pero si influye indirectamente ya que, en un humedal maduro las raíces de los juncos son más gruesas por lo que tienen una mayor capacidad de oxigenación que los humedales nuevos con juncos delgados; es decir, se produce más nitrificación y por ende se remueve más nitrógeno. Esto se evidenció cuando accidentalmente murieron los juncos del humedal antiguo (**H₁**), reduciéndose considerablemente su oxigenación y su capacidad para nitrificar respecto al humedal nuevo (**H₂**).
- Se observó que el confitillo usado como capa superficial del medio filtrante de los humedales sirvieron para impedir que proliferen los mosquitos y zancudos, sin embargo, la desventaja radica en que dificulta la aireación natural del agua residual del humedal, por lo cual los resultados de O.D. en los humedales sin aireación son bajos.
- La operación y mantenimiento en los humedales convencionales, tanto en el antiguo (**H₁**) como en el nuevo (**H₂**), fue muy sencilla y económica ya que no necesitó mano de obra especializada, sin embargo, para el humedal con aireación intermitente (**H₃**) se requirió hacer mantenimiento de los sistemas electromecánicos (bomba y timer), por lo que se concluye que para operar un sistema real, se necesitaría una persona con conocimientos para el manejo de estos equipos.
- La temperatura ejerció una influencia positiva sobre los resultados de las eficiencias de remoción de la carga orgánica en los humedales. Los días más calurosos ayudaron a las bacterias a degradar más rápido la carga orgánica y favorecieron el proceso de nitrificación y desnitrificación.

- Se corroboró que el pH en un humedal tiende a disminuir cuando se reduce el suministro del oxígeno que ingresa, tal como ocurrió cuando murieron los juncos del humedal antiguo (H_1) como consecuencia de una mala poda.
- El humedal con aireación intermitente (H_3) tuvo el menor crecimiento y reproducción de macrófitas durante la fase 1 de puesta en marcha del proyecto (arranque 1: Bomba 6hr ON y 6hr OFF), esto debido al periodo tan largo de aireación y no aireación de la bomba, lo cual originó que se produzca un proceso de nitrificación y desnitrificación incompleto, por lo que terminó generándose altos niveles de nitritos. Cabe señalar que los nitritos son un compuesto tóxico en el agua.
- Los humedales artificiales de flujo horizontal de tipo sub-superficial se oxigenan mediante las raíces de sus plantas, es decir que mientras más gruesas sean las raíces más oxígeno tendrá el humedal, esto se comprobó viendo como aumentaba el O.D. conforme aumentaba la longitud recorrida por el agua residual a través del humedal.
- Los humedales artificiales con aireación intermitente pueden ser una alternativa viable en pequeñas ciudades o comunidades rurales para solucionar el problema del exceso de nitrógeno en el agua residual debido a que han demostrado alta eficiencia, no requieren mucha operación ni mantenimiento como una planta de lodos activados, y además que utilizaría mucho menos energía.
- Se verificó que el humedal con aireación intermitente (H_3) fue mucho más eficiente en remoción de todos los parámetros medidos respecto al humedal antiguo (H_1) y al humedal nuevo (H_2).
- Se observó que en el humedal con aireación intermitente (H_3), la carga orgánica que quedaba luego de cada aireación fue un factor limitante para el proceso de desnitrificación, y por ende, para la remoción de nitrógeno.
- Se observó que en el humedal antiguo (H_1) y en el humedal nuevo (H_2), la cantidad limitada de oxígeno disuelto en el medio es un factor limitante para el proceso de nitrificación, y por ende para la remoción de nitrógeno.
- Se observó que un intervalo adecuado de aireación y no aireación puede hacer que el sistema aproveche al máximo el oxígeno disuelto suministrado para realizar la nitrificación, y a la vez aproveche al máximo la carga orgánica remanente para realizar

la des-nitrificación. Para las condiciones de este sistema, se encontró que el intervalo más eficiente fue de 02 horas con aireación y 04 horas sin aireación.

8.2 Recomendaciones

- En el diseño de humedales se debe de considerar una tubería de drenaje para la purga de sólidos estabilizados que se acumulan en el fondo, para el presente diseño se consideró una purga de 1 pulgada ubicada en el punto más bajo, para humedales maduros, los sólidos acumulados generarían interferencias.
- En el diseño de humedales se debe de considerar un buen sistema de distribución del afluente y garantizar que la recolección sea homogénea, es conveniente que ello se realice aprovechando la gravedad a fin de reducir costos de O&M.
- Considerar una geomalla con orificios de 4mm de diámetro para la separación del confitillo y del medio de soporte, de esta manera reducir el taponamiento de los espacios libres, además de controlar el crecimiento de las macrófitas que favorecería la colmatación del medio filtrante y por ende la variación de la conductividad hidráulica y promoviendo el arrastre de biopelícula.
- Se recomienda realizar investigaciones en las que se pueda evaluar la eficiencia en H_3 al trabajar con una mayor carga orgánica en el afluente, por ejemplo, con desagüe de camal o curtiembre.
- Se recomienda investigar un sistema de humedales artificiales con aireación intermitente en donde se mejore el proceso de desnitrificación inyectándole al humedal el metano producido por el reactor UASB.
- Se recomienda realizar estudios de remoción de Nitrógeno utilizando tiempos de aireación más cortos, o en el caso ideal, utilizando un sensor de O.D.
- Se recomienda evaluar el sistema de humedal con aireación intermitente utilizando TRH mayores.
- Se recomienda realizar una purga periódica de los humedales, esta puede ser cada tres meses o cuando los niveles de turbiedad comiencen a aumentar en el efluente. Asimismo, se recomienda limpiar el tanque de equalización por lo menos una vez por semana para evitar obstrucciones.

- Es conveniente seguir estudiando a los humedales para utilizarlos en los nuevos diseños de tratamiento de aguas residuales a fin de cumplir con las nuevas exigencias de la legislación peruana en cuanto a normativas de saneamiento vigentes: (La R.D. N° 056-2018-ANA y D.S. N° 004-2018-MINAM) que corresponden a clasificación de cuerpos de agua y los estándares de calidad de agua respectivamente.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arias, O. (2004). Estudio de la biodegradación de la materia orgánica en humedales construidos de flujo subsuperficial. Tesina, Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental. Barcelona, España.
- Centro Regional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas. (20 de Enero de 2007). *Macrófitas*. Obtenido de www.cricyt.edu.ar.
- Cooper, P., Severn Trent Water & Water Research Centre (1996). *Reed beds and constructed humedales for wastewater treatment*. Swindon: WRc.
- Crites, R., & Tchobanoglous, G. (2000). *Sistemas de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados*. Santa Fé de Bogota: Mc. Graw Hill.
- Delgadillo, O., Camacho, A., & otros. (2010). Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Cochabamaba, Bolivia: Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua (Centro AGUA).
- Fernández, J., De Miguel E., De Miguel J. & Curt D. (2004). Manual de fitodepuración. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Galindo V. (2007). “Evaluación, Diagnostico y Mejoramiento de la PTAR mediante Humedales Artificiales de Flujo Subsoperficial en el AAHH Oasis –Villa El Salvador” Tesis de la Facultad Nacional de Ingeniería Ambiental. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima –Perú.
- Garay O. & Guillermo A. (2011). “Evaluación Comparativa del Tratamiento Secundario de Aguas Residuales de un Matadero Mediante el Uso de un Humedal Artificial Subsoperficial de Flujo Horizontal y su Variante con Aireación del Lecho

Filtrante a Escala de Laboratorio”. Tesis Facultad de Ingeniería Ambiental. Universidad Nacional de Ingeniería – Lima - Perú.

- Guzmán S., Camarillo R., Mejía A., García Rolando & Durán C. “Eliminación de Organismos Patógenos en Humedales Artificiales que Tratan Aguas Residuales a Escala Prototipo”. Universidad Nacional Autónoma de México.
Dirección:http://www.smbb.com.mx/congresos%20smbb/merida05/TRABAJOS/AR_EA_IV/CIV-64.pdf.
- Hazelip, E. (2004). Depuración natural de aguas. Obtenido de www.maslibertad.com/huerto/Depuracion.htm.
- Huaman C., (2015). “Evaluación de la eficiencia de la remoción de materia orgánica en función a la carga orgánica al ingreso de humedal artificial con lecho volcánico” Tesis de la Facultad Nacional de Ingeniería Ambiental. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima –Perú.
- Kolb, P. (1998). Design of a constructed humedal (pilot plant) for the reclamation of the river Besós. Vienna, Austria: Universidad de Recursos Naturales y Ciencias de la Vida Viena.
- Lahora A. (2000). “Depuración de Aguas Residuales Mediante Humedales Artificiales: La Ptar de Los Gallardos (Almeria)”. España.
Dirección: <http://dialnet.unirioja.es/servlet/ARTÍCULO?codigo=2244838>
- Lara, B.(1999). Depuración de aguas residuales urbanas mediante humedales artificiales, Tesis de Maestría. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña-Instituto Catalán de Tecnología.
- Maldonado V. (2005). “Uso de Humedales para el Tratamiento y Reúso de Aguas Residuales Domésticas” Tesis de Maestría, Facultad Nacional de Ingeniería Ambiental. Universidad Nacional de ingeniería. Lima-Perú.
- Moeller G. (2004). “Tratamiento de Aguas Residuales, Criterios para su Selección”.
- Moscoso J. “Estudio de Opciones de Tratamiento y Reúso de Aguas Residuales en Lima Metropolitana” Consultoría Técnica a la Universidad de Stuttgart para evaluar las opciones de tratamiento y uso de las aguas residuales en Lima Metropolitana, que brinden el soporte en el escenario al Proyecto: “Gestión sostenible del agua y las aguas

residuales en centros de crecimiento urbano afrontando al cambio climático” - Lima Water – LIWA.

Dirección: http://www.lima-water.de/documents/jmoscoso_informe.pdf

- Notijenck . (2013). El Boletín de Novedades de Jenk. Obtenido de Determinación de la Carga Orgánica: <https://www.notijenck.com.ar/notas/determinacion-rapida-de-la-carga-organica-mitos-y-verdades>.
- Oficina Internacional del Agua, UE. (2001). Procesos extensivos de depuración de las aguas residuales adaptadas a las pequeñas y medias colectividades (disco compacto). Luxemburgo: Oficina de las publicaciones oficiales de las comunidades europeas.
- Peña D. & Infante R. (2012). “Evaluación de la Eficiencia de Remoción de un Humedal Artificial en Función de la Granulometría de Grava en el Medio Filtrante” Tesis Facultad de Ingeniería Ambiental. Universidad Nacional de Ingeniería – Lima - Perú.
- Quipuzco L. (2002). “Evaluación del Comportamiento de dos Pantanos Artificiales Instalados en Serie con *Phragmites Australis* para El Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas”. Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica v.5 n.10. Lima.
Dirección: http://revistas.concytec.gob.pe/scielo.php?pid=S1561-08882002000200007&script=sci_arttext.
- Ramírez E., Robles E., Bonilla P., Ramírez P., Gutiérrez A., Martínez E. & Ortiz R. “Aplicación de Humedales Artificiales para el Tratamiento del Agua Residual de Casa-Habitación en Áreas Rurales”. Universidad Nacional Autónoma de México.
Dirección: <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/tratagua/mexicona/R-0019.pdf>.
- Rivas, H. (2005). “Evaluación de la Eficiencia de Tratamiento del Humedal de Cucuchuco, Michoacán México. Informe Final. SEMARNAT. IMTA. Fundación Gonzalo Río Arronte.
- Rolim, S. (2000). Sistemas de Lagunas de estabilización. Cómo utilizar aguas residuales tratadas en sistemas de regadío. Bogotá: McGraw Hill, Institute Of Technology, Pontificia Universidad Javeriana.
- Romero M., Colín A., Sánchez E. & Ortiz L. (2009). “Tratamiento de Aguas Residuales por un Sistema Piloto de Humedales Artificiales: Evaluación de la

Remoción de la Carga Orgánica”. Revista internacional de contaminación ambiental vol.25 no.3.México.

Dirección: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992009000300004&lang=pt.

- Stearman, G. (2003). Pesticide removal from container nursery runoff in constructed wetland cells. *Journal of Environmental Quality*, No 32, 1548-1556.
- Takashi A. “Wastewater Reclamation and Reuse”.
Dirección: [http://books.google.com.pe/books?id=9vAGkleP234C&pg=PA480&lpg=PA480&dq=Bitton,+G.+\(1994\).+Wastewater+microbiology.+Wiley-Liss.+Nueva+York&source=bl&ots=nL39uORL9&sig=WXYZYroNOuacsGCw8-ckkFuwhyQ&hl=es&sa=X&ei=41mfU-7DEqXLsQSU-oKgCw&ved=0CDAQ6AEwAw#v=onepage&q=Bitton%2C%20G.%20\(1994\).%20Wastewater%20microbiology.%20Wiley-Liss.%20Nueva%20York&f=false](http://books.google.com.pe/books?id=9vAGkleP234C&pg=PA480&lpg=PA480&dq=Bitton,+G.+(1994).+Wastewater+microbiology.+Wiley-Liss.+Nueva+York&source=bl&ots=nL39uORL9&sig=WXYZYroNOuacsGCw8-ckkFuwhyQ&hl=es&sa=X&ei=41mfU-7DEqXLsQSU-oKgCw&ved=0CDAQ6AEwAw#v=onepage&q=Bitton%2C%20G.%20(1994).%20Wastewater%20microbiology.%20Wiley-Liss.%20Nueva%20York&f=false).
- Tercero M. (2016) “Procesos Biogeoquímicos y eliminación de nitrógeno y fósforo de aguas eutrofizadas en humedales del entorno del Mar Menor: resultados experimentales en mesocosmos. Tesis Doctoral de la Universidad Politécnica de Cartagena.
- Torres A., Hernández N., Fausto A. y Martínez F. (2017) “Evaluación de tres Sistemas de Humedales Híbridos a escala piloto para la remoción de Nitrógeno”. Revista Internacional de Contaminación Ambiental vol.33 no.1 México. Universidad de Guadalajara.
Dirección: <https://dx.doi.org/10.20937/rica.2017.33.01.03>.
- Villarroel A. “Tratamiento Terciario del Efluente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales el Cortijo para Uso Agrícola con Humedales Construidos de Flujo Superficial”. Universidad Nacional de Trujillo.
Dirección: http://www.ciiq.org/varios/peru_2005/Trabajos/III/3/3.3.15.pdf
- Villegas J., Guerrero J., Castaño R. & Paredes D. (2006). “Variaciones al Sistema Tanque Séptico (TS)-Filtro Anaeróbico de Flujo Ascendente (FAFA)-Humedal Artificial de Flujo Sub-superficial (HAFSS) con miras al Tratamiento de Aguas Residuales en Pequeños Municipios de Colombia”. Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería. Universidad del Zulia Maracaibo. Maracaibo-Venezuela.

ANEXO 1 – GALERÍA DE FOTOS

A continuación, se presenta fotos que fueran tomadas con la finalidad de evidenciar las distintas actividades que se fueron realizando a lo largo del desarrollo de la presente investigación.



Figura 42. Armado del humedal



Figura 43. Habilitación del humedal



Figura 44. Toma de muestras de O.D. en puntos intermedios del Humedal.

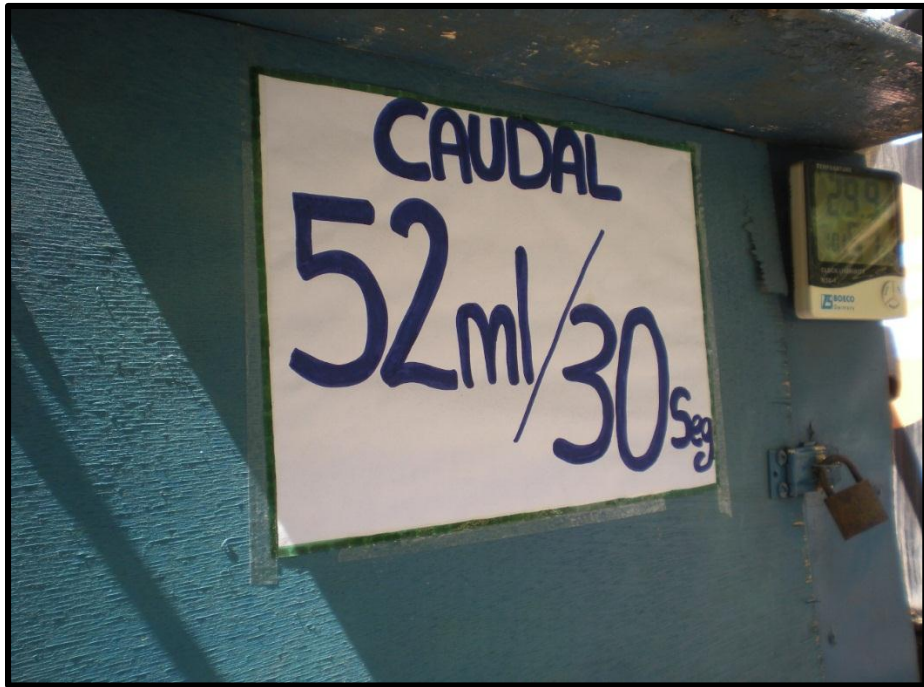


Figura 45. Caudal de abastecimiento al humedal

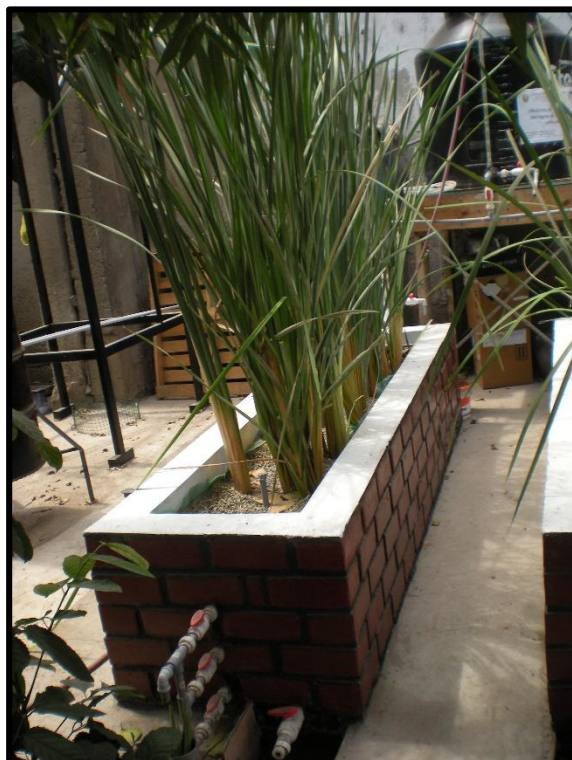


Figura 46. Humedal Antiguo (H1)



Figura 47. Humedal Nuevo (H2)



Figura 48. Humedal con Aireación Intermitente (H3)



Figura 49. Punto de Muestreo del Efluente en el Humedal H2



Figura 50. Análisis de turbiedad



Figura 51. Determinación de pH



Figura 52. Determinación de OD



Figura 54. Purga de lodos



Figura 53. Oxidómetro, equipo de medición de OD



Figura 55. Macrófitas del humedal

ANEXO 2 - MEDICIÓN DE PARÁMETROS

- **Parámetros evaluados**

Los parámetros evaluados se midieron siguiendo los procedimientos de los Métodos Estandarizados para la examinación del Agua y Desagüe (*Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater), ed. 1995.

* Standard Methods es una publicación en forma conjunta de la Asociación de salud pública americana, la asociación americana de servicios de agua, la federación ambiental del agua, en inglés: The American Public Health Association (APHA), the American Water Works Association (AWWA), and the Water Environment Federation (WEF).

- ✓ **Protocolo de medición de parámetros físicos**

- a) **Turbiedad**

La turbiedad se midió 2 veces por día (09:00hrs y 15:00hrs)

Materiales e instrumentos:

- ❖ 1 turbidímetro
- ❖ 1 Cronometro



Figura 56. Turbidímetro de laboratorio

b) Temperatura

La temperatura se evaluó 2 veces por día (09:00hrs y 15:00hrs), se midieron dos temperaturas: temperatura del ambiente y la temperatura de la muestra, la del ambiente se midió insitu con el termo hidrómetro y la de las muestras en laboratorio con el equipo multiparámetro.

Materiales e instrumentos

- ❖ 1 Termo hidrómetro
- ❖ 1 Equipo multiparámetro de sensor



Figura 57. Vista del Termo hidrómetro

c) pH

El pH se midió 2 veces por día (09:00hrs y 15:00hrs)

Materiales e instrumentos

- ❖ 1 Equipo multiparámetro de sensor



Figura 58. Equipo Multiparámetro de pH y Temperatura

d) Conductividad

La conductividad se midió dos veces por día (09:00hrs y 15:00hrs).

Materiales e Instrumentos:

- ❖ 1 Conductímetro



Figura 59. Conductímetro

e) Humedad Relativa

La humedad relativa se midió 2 veces por día (09:00hrs y 15:00hrs).

Materiales e instrumentos:

- ❖ 1 Termo hidrómetro



Figura 60. Termo hidrómetro

✓ Protocolo de medición de parámetros químicos y biológicos**a) Oxígeno disuelto (OD)**

El Oxígeno disuelto se midió 2 veces por día (09:00hrs y 15:00hrs).

Materiales e instrumentos:

- ❖ 1 Oxidímetro

b) Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅)

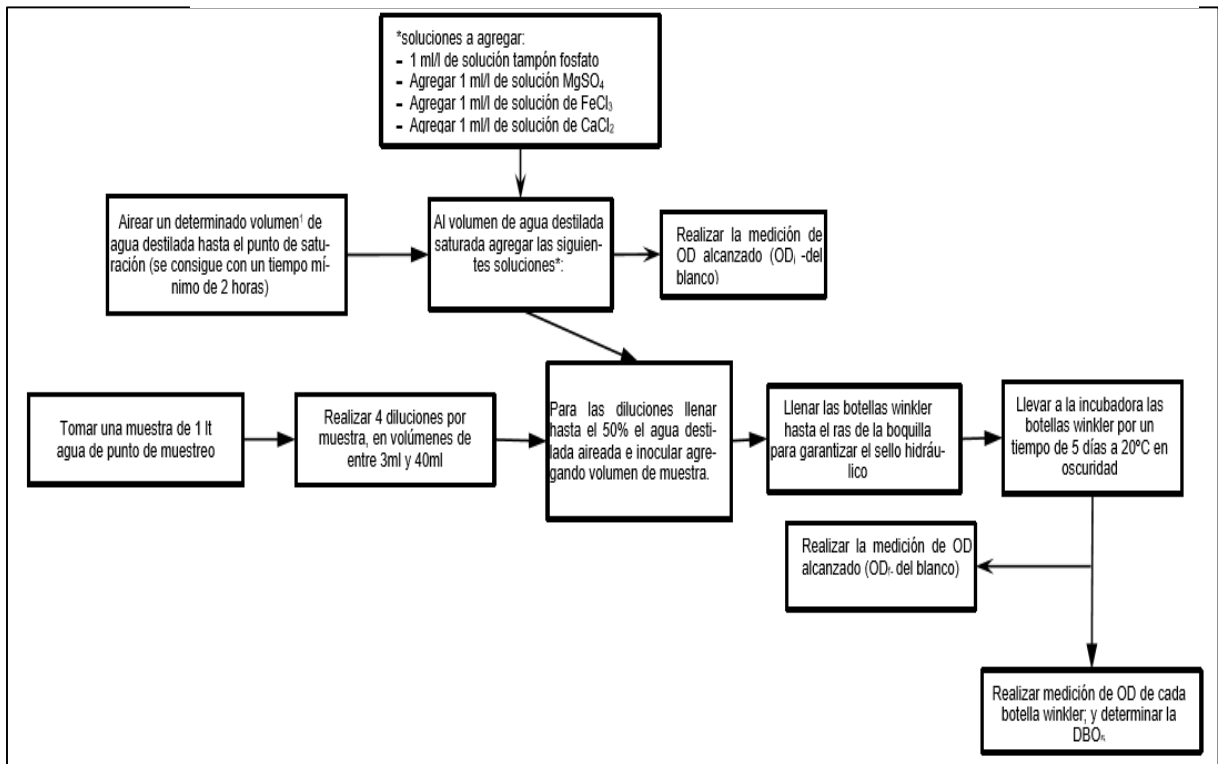
Se hicieron tres mediciones de DBO_5 en el proceso de desarrollo de la investigación

Materiales, instrumentos y reactivos:

- ❖ Balde de 10 lt
- ❖ Vaso de vidrio de 2 lt
- ❖ Bombilla de aireación con manguera y difusor
- ❖ Solución cloruro férrico
- ❖ Solución sulfato magnesio
- ❖ Solución buffer
- ❖ Solución cloruro calcio
- ❖ Agua esterilizada
- ❖ 1 Oxidímetro para la medición de OD

Esquema de procedimiento empleado fue el siguiente:

Figura 61. Diagrama de flujo de Metodología para medición de DBO_5 (Método de las diluciones).



Fuente: "Evaluación de la eficiencia de la remoción de materia orgánica en función a la carga orgánica al ingreso de humedal artificial con lecho volcánico". Huamán, Cyrill (2017).

El volumen de agua destilada a airear debe ser suficiente, se utilizó 4 disoluciones por muestra que equivale a 4 embaces winkler de 300 ml.

Tapar cuidadosamente para evitar burbujas de aire y mezclar invirtiendo la botella varias veces.

c) Demanda Química de Oxígeno (DQO₅)

La DQO se midió una vez por semana.

Materiales, instrumentos y reactivos:

- ❖ Vasos de vidrio de 50 ml
- ❖ 04 Pipetas de 10 ml
- ❖ 04 Pipetas de 1 ml
- ❖ Pera de succión
- ❖ Agua esterilizada
- ❖ Pizeta de 1 lt
- ❖ Viales de para DQO
- ❖ Digestor de DQO (DRB 200)
- ❖ Colorímetro DR 850
- ❖ Bomba de vacío con accesorios
- ❖ Matraz Kitosato de 500 ml
- ❖ Filtro para DQO soluble



Figura 62. Encender Digestor de DQO



Figura 63. Rotulado de los viales



Figura 64. Pipeteo de Muestras

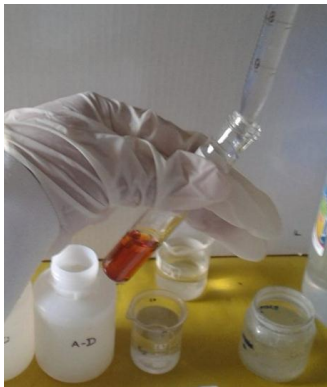


Figura 65. Mantener la muestra con un ángulo de 45°



Figura 66. Cierre hermético el tapón del vial



Figura 67. Agitación de los viales



Figura 68. Colorímetro para resultados de DQO

d) Sólidos

Los sólidos se midieron una vez por semana.

Sólidos totales (ST): Residuo remanente después que la muestra ha sido evaporada y secada a una temperatura específica (103 a 105°C)

Sólidos volátiles totales (SVT): Sólidos que pueden ser volatilizados e incinerados cuando los ST son calcinados (500 +/- 50°C).

Sólidos fijos totales (SFT): Residuo que permanece después de incinerar los ST (500 +/- 50°C).

Sólidos suspendidos totales (SST): Fracción de ST retenido sobre un filtro con tamaño de poro específico, medido después de que ha sido secado a una temperatura específica. El filtro más usado para la determinación de SST es el filtro Whatman de fibra de vidrio que tiene un tamaño nominal de poros aproximadamente 1.58 μm .

Sólidos suspendidos volátiles (SSV): Estos sólidos pueden ser volatilizados e incinerados cuando los SST son calcinados (500 +/- 50°C).

Sólidos disueltos totales (SDT) (ST-SST): Sólidos que pasan a través del filtro y luego son evaporados y secados a una temperatura específica. La medida de los SDT comprende coloides y sólidos disueltos. Los coloides son de tamaño 0.001 μm a 1 μm .

Sólidos disueltos volátiles (SDV) (SDV-SST): sólidos que pueden ser volatilizados e incinerados cuando los SDT son calcinados (500 +/- 50°C).

Sólidos disueltos fijos (SDF): Residuo remanente después de calcinar los SDT (500 +/- 50°C).

Materiales, instrumentos y reactivos:

- ❖ Probeta de 100 ml
- ❖ Soporte universal
- ❖ Balanza electrónica
- ❖ Plancha de calentamiento
- ❖ Mufla
- ❖ Horno

- ❖ Desecador
- ❖ Cápsulas de porcelana de 25 ml
- ❖ Papel filtro whatman N° 40
- ❖ Tijeras de crisol
- ❖ Embudo de vidrio

e) Nitrógeno

Nitrógeno Total (NT):

Durante la etapa experimental se hizo una medición a la semana.

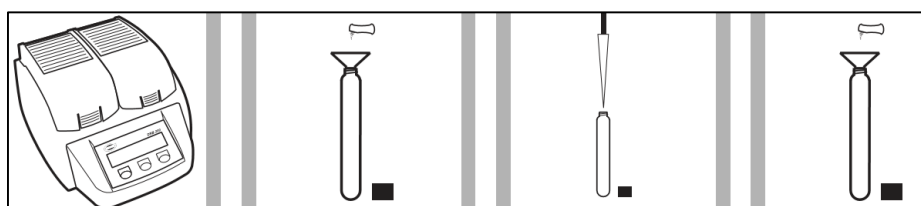


Figura 69. Adición de la primera almohadilla al vial para preparar la muestra y el blanco

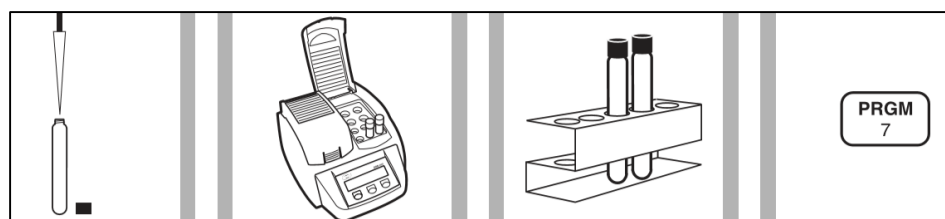


Figura 70. Muestra y blanco después del digestor

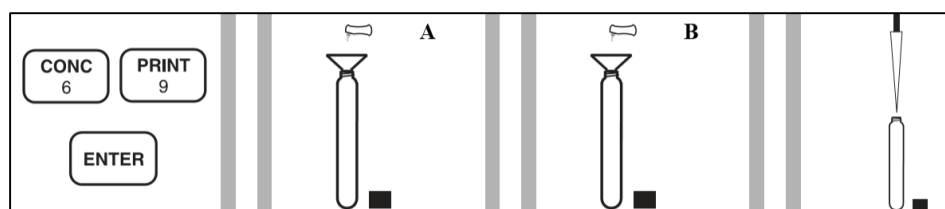


Figura 71. Adición de un segundo y tercer reactivo a la muestra y al blanco

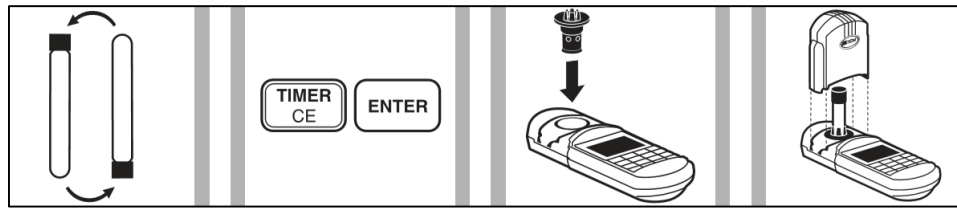


Figura 72. Pipeteo de 2ml de la muestra y el blanco para adicionar a un tercer vial y calibración con la lectura del blanco en el colorímetro

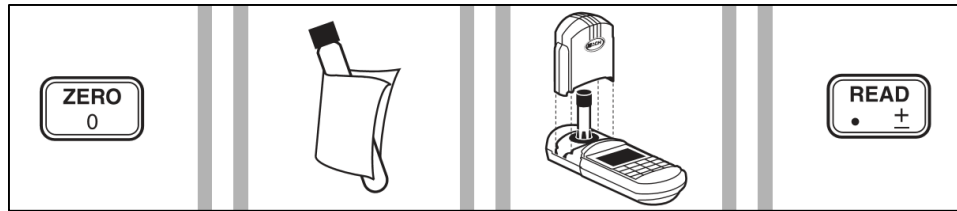


Figura 73. Lectura final de la muestra

Nitritos:

Durante la etapa experimental se hizo una medición a la semana.

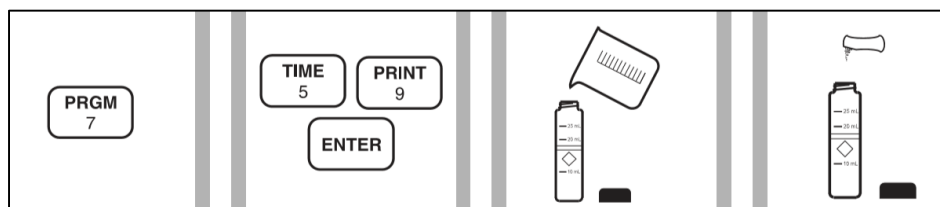


Figura 74. Adición de la muestra junto con la almohadilla para la medición

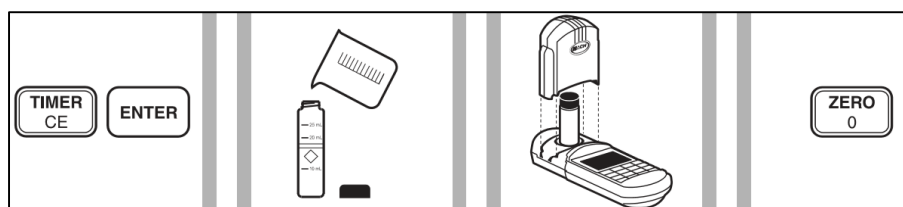


Figura 75. Calibración del colorímetro con el blanco

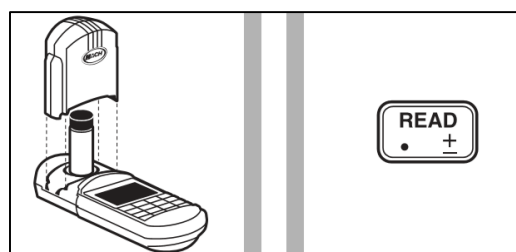


Figura 76. Medición de la muestra en el colorímetro

Nitratos:

Durante la etapa experimental se hizo una medición a la semana.

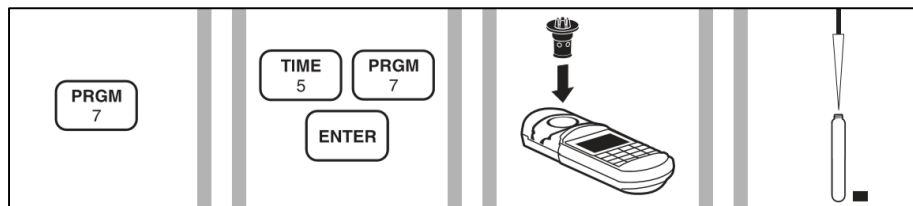


Figura 77. Inicio y calibración del Colorímetro DR-890 con el blanco

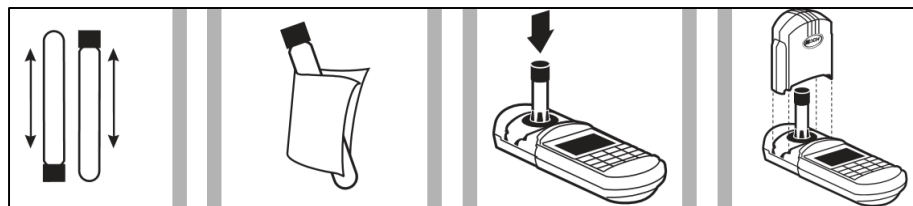


Figura 78. Agitación de la muestra para su lectura

Nitrógeno Amoniacal:

Durante la etapa experimental se hizo una medición a la semana.

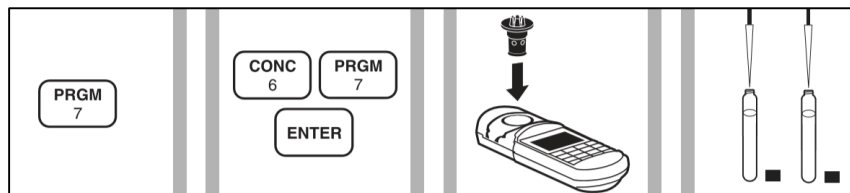


Figura 79. Programación del colorímetro y adición de la muestra y el blanco a los viales

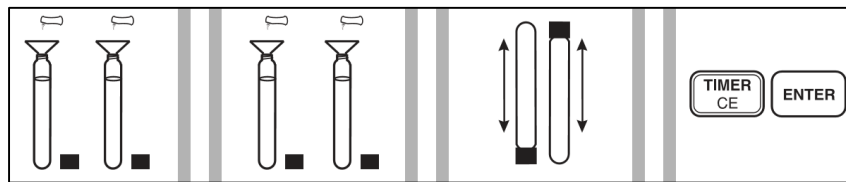


Figura 80. Adición de dos almohadillas y agitación de la muestra y el blanco

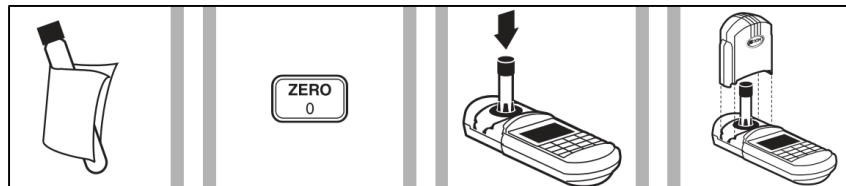


Figura 81. Calibración del colorímetro con el blanco y medición de la muestra