



**UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
FACULTAD DE BIOLOGÍA**

**PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

TESIS

**Diseño de un Sistema Mecánico Sustentable a Escala Piloto para
Incrementar la Autodepuración de Cauces de Bajo Flujo.**

Para obtener el grado de
MAESTRA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL

Presenta

Viridiana Martínez Ruiz|

Ingeniera en Industrias Alimentarias

Director de Tesis

**Doctor en Ciencias y Tecnología Ambiental
José Apolinar Cortés**

Morelia, Michoacán. Septiembre de 2014.

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
RESUMEN	IX
SUMMARY	X
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. MARCO TEÓRICO.....	6
2.1. OXÍGENO	6
2.2. EFECTO DE LAS DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES SOBRE UN CUERPO DE AGUA	6
2.3. DILUCIÓN Y AUTODEPURACIÓN DE UN CUERPO DE AGUA.....	7
2.4. PROCESO DE TRANSFERENCIA DE UN GAS A UN CUERPO DE AGUA	8
2.5. AIREACIÓN INDUCIDA EN SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	10
2.6. CONTAMINANTES EN EL AGUA RESIDUAL	12
2.7. PARÁMETROS DE CALIDAD DEL AGUA	12
2.8. LEGISLACIÓN AMBIENTAL	14
2.9. SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	15
2.9.1 <i>Tratamientos Primarios / Físicos</i>	16
2.9.2 <i>Tratamientos Secundarios / Biológicos</i>	16
2.9.3 <i>Tratamientos Terciarios / Avanzados</i>	17
2.10. IMPORTANCIA DE LA ENERGÍA	18
2.11. TECNOLOGÍA DE MOLINOS HIDRÁULICOS PARA EL APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA	19
2.11.1 <i>Potencia Transmitida por un Eje</i>	20
3. ESTADO DEL ARTE	21
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	24
JUSTIFICACIÓN	24
HIPÓTESIS	25
OBJETIVO GENERAL	25
<i>Objetivos Específicos</i>	25
4. METODOLOGÍA.....	26
4.1. BATERÍA DE PRUEBAS	29
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	30
5.1. CONSTRUCCIÓN DE PROTOTIPO	30
5.1.1. <i>Funcionamiento del Sistema Mecánico de Aireación y Generación de Energía</i> ...	33
5.1.2. <i>Alimentación de Agua al Canal Abierto</i>	35

5.1.3. Velocidades y Potencia Transmitida por el Eje de la Propela.....	36
5.1.4. Tiempo de Retención Hidráulico (TRH).....	43
5.2. RESULTADOS DE LA ETAPA 1: AGUA POTABLE	44
5.2.1. Generación de Burbujas.....	44
5.2.2. Oxígeno Disuelto	46
5.2.3. Temperatura	51
5.2.4. Conductividad.....	53
5.2.5. Presión Atmosférica	54
5.2.6. Coeficientes de Transferencia de Oxígeno (K_{La}), en Etapa 1.....	54
5.3. RESULTADOS DE LA ETAPA 2: AGUA RESIDUAL	58
5.3.1 Caracterización de una Cascada sobre el Rio Chiquito y Muestreo de Agua Residual.....	58
5.3.2 Oxígeno Disuelto	62
5.3.3 Temperatura	65
5.3.4 pH	65
5.3.5 Conductividad.....	66
5.3.6 DQO.....	66
5.3.7 Sólidos	68
5.3.8 Coeficientes de Transferencia de Oxígeno (K_{La}), para Etapa 2.....	71
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	73
7. REFERENCIAS	75
8. ANEXOS	77
8.1. MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN Y DE LABORATORIO	77
8.2. CONSTRUCCIÓN DE PROTOTIPO Y FUNCIONAMIENTO DEL ACOPLAMIENTO MECÁNICO	78

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Volumen de Descargas de Aguas Residuales.....	3
Tabla 2. PTAR´s por Región Hidrológico-Administrativas, 2012.....	4
Tabla 3. Parámetros de Calidad del Agua.	13
Tabla 4. Límites Máximos Permisibles para Descarga en Cuerpos de Agua.....	15
Tabla 5. Variables a Medir para las Pruebas Exploratorias y Métodos de Análisis.....	28
Tabla 6. Pruebas Exploratorias para Etapa 1.....	29
Tabla 7. Pruebas Exploratorias para Etapa 2.....	29
Tabla 8. Elementos del Prototipo de Canal Abierto.	31
Tabla 9. Pruebas Finales para Etapa 1.....	35
Tabla 10. Aforos de Diferentes Condiciones de Apertura de Válvulas.....	36
Tabla 11. Caudales Definidos para las Pruebas.....	36
Tabla 12. Área de Paso para Vertedores (m ²).	37
Tabla 13. Velocidades y RPM.....	38
Tabla 14. RPM y Velocidades sobre el Vertedor.	39
Tabla 15. RPM con y sin Acoplamiento.	40
Tabla 16. % de Pérdida de Energía por Uso de Acoplamiento (Eje-Diafragma).....	41
Tabla 17. Cálculo de la Potencia Transmitida por el Eje.	41
Tabla 18. TRH en Cada Condición de Flujo y Vertedores.....	43
Tabla 19. TRH en Tanque de Aireación.....	44
Tabla 20. Velocidad del Agua en Tanque de Aireación.....	45
Tabla 21. Comparativa de Asimilación de OD.....	51
Tabla 22. Relación entre la Conductividad y Salinidad.	53
Tabla 23. Temperatura y Concentración de Saturación de OD.....	55
Tabla 24. Coeficientes de Transferencia de Oxígeno para Etapa 1.....	56
Tabla 25. Pruebas Finales para Etapa 2.....	61
Tabla 26. Velocidades del Agua en Canal Aguas Arriba.	62
Tabla 27. Velocidades Máxima y Mínima Observadas en Río Chiquito.	62
Tabla 28. Sólidos.	68
Tabla 29. Coeficientes de Transferencia de Oxígeno para Etapa 2.....	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Usos del Agua.	2
Figura 2. Volúmenes de Agua Residual Generada, Colectada y Tratada En 2007.	3
Figura 3. Curva de Oxígeno.	7
Figura 4. Resistencia de un Gas a Permanecer, o No, en Fase Líquida.	8
Figura 5. OD en Agua con Relación a la Elevación y Temperatura.	9
Figura 6. A) Rueda Movida por Arriba; B) Rueda Movida por el Costado; Y C) Rueda Movida por Debajo.	20
Figura 7. U- Tube Type Aeration System.	31
Figura 8. Lodos Microbianos.....	27
Figura 9. Prototipo de Canal Abierto, Diseño AUTOCAD 2013.....	30
Figura 10. Prototipo de Canal Abierto.	33
Figura 11. Esquema General del Proceso de Transferencia de Masa y Energía.	33
Figura 12. Embalse de Agua en Canal Abierto.	34
Figura 13. Burbujas Provocadas por la Propela.	34
Figura 14. Acoplamiento Mecánico Eje-Diafragma.....	34
Figura 15. Pruebas Exploratorias con Vertedor Rectangular.	36
Figura 16. Pruebas Exploratorias con Vertedor Triangular.....	37
Figura 17. Caudales.	38
Figura 18. Velocidad a través del Vertedor vs Caudal.	39
Figura 19. RPMs vs Velocidades a través del Vertedor.	40
Figura 20. Potencia Transmitida por el Eje.	43
Figura 21. Tanque de Aireación y Burbujas en Ascenso.	44
Figura 22. Burbujas dentro del Canal Medio.	45
Figura 23. Áreas de Paso en Tanque de Aireación.....	55
Figura 24. OD vs Tiempo para $Q = 0.13 \text{ L/s}^*$	47
Figura 25. OD vs Tiempo para $Q = 0.22 \text{ L/s}^*$	47
Figura 26. OD vs Tiempo para $Q = 0.4 \text{ L/s}^*$	48
Figura 27. % SAT OD (*).	48
Figura 28. OD vs Tiempo para $Q = 0.22 \text{ L/s}^{**}$	49
Figura 29. OD vs Tiempo para $Q = 0.4 \text{ L/s}^{**}$	49
Figura 30. % SAT OD (**).	50
Figura 31. OD vs Tiempo (Cascada en Canal Abierto).....	51
Figura 32. Temperatura.	52
Figura 33. Curva de Saturación de OD.	52
Figura 34. Conductividad.	53
Figura 35. Presión Atmosférica.	54
Figura 36. Velocidades de Transferencia de Oxígeno a 20°C	57

Figura 37. OD en Cascada Río Chiquito.	58
Figura 38. % SAT OD en Cascada Río Chiquito.	59
Figura 39. Temperatura en Cascada Río Chiquito.	59
Figura 40. pH en Cascada Río Chiquito.	60
Figura 41. Conductividad en Cascada Río Chiquito.	60
Figura 42. DQO total en Cascada Río Chiquito.	61
Figura 43. OD vs Tiempo para $Q = 0.13 \text{ L/s}^*$	63
Figura 44. OD vs Tiempo para $Q = 0.22 \text{ L/s}^*$	63
Figura 45. OD vs Tiempo para $Q = 0.44 \text{ L/s}^*$	64
Figura 46. % SAT OD Final.	64
Figura 47. Temperatura.	65
Figura 48. pH.	65
Figura 49. Conductividad.	66
Figura 50. DQO.	67
Figura 51. Porcentaje de Remoción de DQOs.	68
Figura 52. Sólidos Totales.	69
Figura 53. Sólidos Suspendidos.	70
Figura 54. Sólidos Disueltos.	70
Figura 55. Velocidades de Transferencia de Oxígeno en Agua Residual, a 20°C	72
Figura 56. Etapa de Construcción de Prototipo.	78
Figura 57. Canal Abierto a Prueba de Fugas.	79
Figura 58. Instalación del Acoplamiento Mecánico.	79
Figura 59. Funcionamiento de Acoplamiento Mecánico, Propela - Eje- Diafragma.	88

RESUMEN

La contaminación por agua residual que reciben los ríos es un problema debido al aumento de la población y mala planeación urbana, lo que ha afectado la calidad del agua. Las descargas alteran el balance de OD ocasionando la muerte de vida acuática; por ello se trabajó con un sistema para mitigar este efecto, siendo un sistema de autodepuración que podría ser instalado sobre los ríos, empleando un sistema mecánico de *molino hidráulico*, aprovechando la energía de la corriente para moverlo y favoreciendo la transferencia de oxígeno. Se trabajó con tres caudales (0.4 L/s, 0.22 L/s y 0.13 L/s) y cuatro pendientes (0%, 1%, 2% y 3 %) en un canal abierto, simulando un cauce, y se realizaron pruebas con agua potable y residual, removiendo el oxígeno con Na_2SO_3 , para luego medir la capacidad de aireación y degradación del sistema. Se obtuvieron concentraciones de OD desde 3.4 a 6.3 mg/L por reaireación, rango donde se mantenían los resultados de las pruebas, y se trabajó a una temperatura de 23°C y pH neutro. Se midieron remociones de DQO en promedio de 17%. Este sistema favorece la entrada OD al agua, mediante microburbujas, oxidando la materia orgánica contaminante, con el beneficio de ser un sistema sustentable que evita el uso de energía eléctrica, y mejora la calidad del agua.

Palabras Clave: *Agua residual, Oxígeno disuelto (DO), Autodepuración, Sistema mecánico, Reaireación.*

SUMMARY

The sewage contamination that receives rivers is a problem due to population growth and poor urban planning, which has affected water quality. The wastewater discharges alter the Dissolved Oxygen's balance in the water, causing the death of aquatic life; that's why it was designed a system to mitigate this effect, being a self-purification system that could be installed on the rivers using a mechanical hydraulic mill, using the energy of the stream to move it and favoring the transfer of oxygen. In this investigation, it was worked with three flows (0.4 L/s, 0.22 L/s and 0.13 L/s) and four slopes (0%, 1%, 2% and 3%) in an open channel, simulating a river, and tests were performed with water and wastewater, removing oxygen with Na_2SO_3 , and then measuring the air capacity and system degradation. The Dissolved Oxygen's concentrations were obtained from 3.4 to 6.3 mg/L for reaeración, range where whole results remained, and was operated at a temperature of 23 °C and neutral pH. COD removals were measured on average 17%. This system facilitates input Dissolved Oxygen in water by microbubbles to oxidize organic contaminants, with the benefit of being a sustainable system which avoids the use of electrical energy, and improving water quality.

Keywords: Sewage, self-purification, dissolved oxygen, mechanical system, reaeration.

1. INTRODUCCIÓN

La falta de control de las fuentes de contaminación puntual y difusa que reciben los arroyos, ríos y cuerpos de agua del país, es un problema que se ha agravado por el aumento de la población y la falta de planeación urbana, lo que ha traído como consecuencia la afectación de la calidad de sus corrientes y de los ecosistemas circundantes en nuestro país (Agenda del Agua 2030, 2011). Según estimaciones de la CONAPO, la población en México se incrementará alrededor de 20.4 millones de personas (de 117 millones de habitantes en 2012 a 137 millones habitantes en 2030) (Atlas del Agua en México 2013), por lo cual el problema se tornará más complejo si no se toman medidas adecuadas.

Las principales fuentes de aguas residuales son de origen doméstico, industrial, pluviales y escurrimientos por riego agrícola (Ramalho, 1983). El agua utilizada de estas prácticas, ya sea para subsistir o para producir e intercambiar bienes y servicios, pueden variar en función del desarrollo social y económico de cada sitio (SEMARNAT, 2011).

El uso del agua en la agricultura ha generado contaminación difusa por el escurrimiento no controlado de sales disueltas a los cuerpos de agua. Es una actividad de miles de años con el fin de obtener alimentos para el desarrollo de las poblaciones, pero cada día se demanda más alimentos, y para ello se requiere plantar más extensiones (Programa Hídrico Visión 2030, del Edo. de Michoacán de Ocampo, 2009).

El agua empleada para las actividades industriales también genera aguas residuales, que de manera puntual o controlada (tuberías) aportan líquidos que derivan directamente de la fabricación de todo tipo de productos, y consisten en disoluciones acuosas a distinta concentración de los productos empleados en el proceso productivo; los líquidos residuales son muy variables, altamente tóxicos y que difícilmente son removidos del medio acuático (IMTA, 2005).

El uso del agua para fines domésticos dependerá de la disponibilidad de agua potable en la red, y por ende se generará agua residual que será drenada por el alcantarillado disponible. Se considera que la cobertura de agua potable incluye a las personas que tienen agua entubada

dentro de su vivienda, de la llave pública, o de otra vivienda, siendo la cobertura de 90%. Esta agua se considera menos contaminante en comparación con el agua residual proveniente del uso de riego e industrial ya que proviene de las actividades cotidianas en casas habitación (Fuente: CONAGUA. Subdirección General de Planeación. 2013. Elaborado a partir de: INEGI).

La distribución de agua para los diferentes usos se puede resumir en la Figura 1, donde se muestra mayor uso por parte de la actividad agrícola con un 76.6%, seguida del abastecimiento público con un 14.5%, y la industria con un 4%. Se considera el uso para la generación de energía eléctrica con un 4.9% (Atlas del Agua en México 2013).

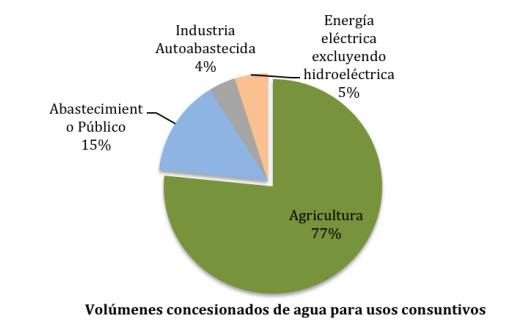


Figura 1. Usos del Agua.

El volumen de aguas residuales municipales y no municipales, así como el volumen tratado se presenta en la Tabla 1 (Atlas del Agua en México 2013), en donde se muestra la generación de 1.9 millones de toneladas de DBO₅ al año para agua municipal, de la cual sólo 0.69 millones de toneladas de DBO₅ al año son removidos (35%). Así también para el caso de uso no municipal e industrial, se genera una carga contaminante de 9.9 millones de toneladas de DBO₅ al año, y se remueven 1.3 millones de toneladas de DBO₅ al año (13%) (CONAGUA, Subgerencia General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento, 2013. Subdirección General Técnica, 2013).

Tabla 1. Volumen de Descargas de Aguas Residuales.

Descargas De Aguas Residuales				
	Centros Urbanos (Descargas Municipales)		Usos no municipales, incluyendo a la industria	
Volumen	miles de hm ³ /año	m/s	miles de hm ³ /año	m/s
Aguas residuales	7.24	229.7	6.61	209.84
Se colectan en alcantarillado	6.63	210.2		
Se tratan	3.15	99.8	1.91	60.53
Carga Contaminante	millones de toneladas de DBO ₅ al año		millones de toneladas de DBO ₅ al año	
Se generan	1.96		9.92	
Se colectan en alcantarillado	1.79			
Se remueven en los sistemas de tratamiento	0.69		1.3	

Además, se espera que aumente este volumen a 9.7 miles de millones de metros cúbicos en 2030 y, para entonces, es probable que sólo el 38% de esas aguas residuales reciba tratamiento de acuerdo con el nivel requerido por la Ley de Agua Nacionales (1992) (Agenda del Agua, 2030, 2012).

En el caso particular de Michoacán, de acuerdo al *Programa Hídrico Visión 2030, del Estado De Michoacán de Ocampo* (Figura 2), se observa que en el 2007 se generaron 376 hm³/ año de agua residual, de las cuales se pudieron colectar 268 hm³/ año por la red de alcantarillado; además, que solo se logró sanear el 31.9% (85 hm³/ año).

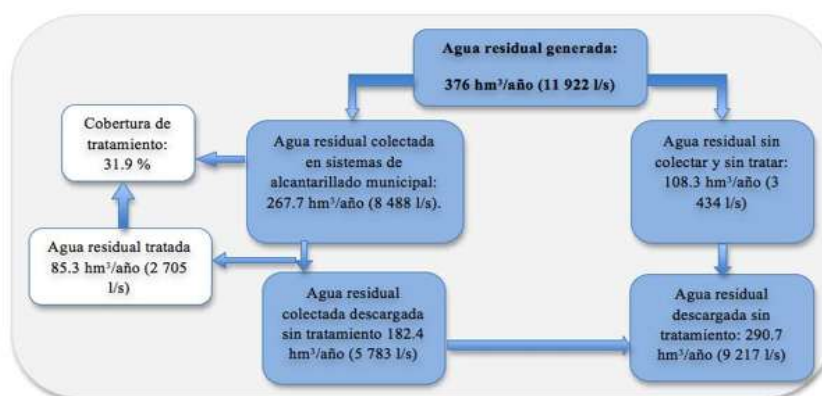


Figura 2. Volúmenes de Agua Residual Generada, Colectada y Tratada En 2007.

Fuente: Programa Hídrico Visión 2030, del Estado de Michoacán de Ocampo., 2009. A Partir de Información Proporcionada por la Dirección Local Michoacán, CONAGUA.

En la actualidad se tienen instaladas PTAR's en todo el país, como se muestra en la Tabla 2, y en particular a las Regiones hidrológicas (IV Balsas y VIII Lerma-Santiago-Pacífico) a las cuales pertenece Michoacán, y otros estados aledaños, se tiene instalada una capacidad de 39 m³/s, y sólo se trata el 77%.

Tabla 2. PTAR's por Región Hidrológico-Administrativas, 2012.

PTAR's Municipales en Operación, por Región Hidrológico-Administrativas, 2012				
No.	Región	Plantas en Operación	Capacidad Instalada (m³/s)	Caudal Tratado (m³/s)
I	Península de Baja California	62	9.2	6.39
II	Noroeste	101	5.24	3.34
III	Pacífico Norte	342	10.08	7.75
IV	Balsas	207	9.81	7.33
V	Pacífico Sur	87	4.6	3.51
VI	Río Bravo	227	33.45	22.13
VII	Cuencas Centrales del Norte	138	6.03	4.79
VIII	Lerma-Santiago-Pacífico	588	29.73	23.05
IX	Golfo Norte	117	5.66	4.31
X	Golfo Centro	145	7.35	5.59
XI	Frontera Sur	119	3.7	2.55
XII	Península de Yucatán	89	3.05	1.98
XIII	Aguas de Valle de México	120	12.25	7.02
Total		2342	140.15	99.74

Sólo para Michoacán, la CONAGUA reporta 64 PTAR's en 2007, de las cuales 10 PTAR's son urbanas y tratan el 90% del caudal recolectado, mientras que existen 29 PTAR's rurales, en las cuales sólo el 2% es tratado; y las restantes no operan por diferentes causas, entre ellas, insuficiente capacidad para solventar sus costos de operación y mantenimiento, o bien, deficiencia en la construcción de las obras y falta de personal capacitado.

La falta de tratamiento adecuado hace que se viertan en arroyos, ríos, lagunas, lagos y mares, grandes cantidades de materia orgánica, lo cual ocasiona la disminución del oxígeno disuelto y la formación de depósitos de lodos que son considerados como la perturbación ambiental más importante que afecta al medio acuático (Ramalho, 1983) y que pueden ser medidos a través de tres indicadores principales: la Demanda Bioquímica de Oxígeno a cinco días (DBO₅), la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y los Sólidos Suspendidos Totales (SST). En los sitios

donde se presentan altos niveles de DQO y DBO_5 son en zonas urbanas del país, mientras que los SST se encuentran cerca de sitios agrícolas (CONAGUA, Sudirección General Técnica, 2013).

Aunado al esfuerzo por mantener un constante monitoreo en los cuerpos de agua, es importante desarrollar y aplicar conocimientos de Ingeniería, Ciencias Básicas, Ciencias Biológicas, Ciencias de la Tierra, entre otras disciplinas, para disminuir y/o mitigar el efecto de las descargas residuales de las ciudades, los cuales ocasionan deterioro notorio por la falta de oxígeno disuelto.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Oxígeno

El oxígeno es un elemento químico que forma parte del aire en un 21%, acompañado del nitrógeno y otros gases. En condiciones normales de presión y temperatura dos átomos del elemento se unen para formar un gas diatómico (O_2), el cual es un no metal, altamente reactivo, incoloro y sin sabor. En fase líquida es un elemento que constituye la mayor parte de la masa del agua y de los seres vivos.

La alta concentración de oxígeno en la Tierra es el resultado del ciclo biogeoquímico de recirculación, que describe el movimiento del oxígeno en el planeta (la atmósfera, la biosfera y litosfera), cuyo factor más importante es la fotosíntesis (Reacción 1), la cual libera oxígeno a la atmósfera, y que se da por algas, plantas y bacterias fotosintéticas, mientras que los procesos de respiración y descomposición (proceso inverso), lo consumen (Reacción 2).



En sistemas acuáticos, los organismos vivos aerobios requieren de una gran disponibilidad de oxígeno para llevar a cabo sus funciones metabólicas; sin embargo, no todos los sistemas cuentan con ésta disponibilidad, ya que como se mencionó anteriormente, esta se ve afectada por la contaminación, lo que ha ocasionado la modificación del ecosistema, con la consecuente muerte del fitoplancton, zooplancton y peces.

2.2. Efecto de las Descargas de Aguas Residuales Sobre un Cuerpo de Agua

El efecto que puede causar el vertido de aguas residuales sobre un cuerpo de agua, varía considerablemente dependiendo de sus características físicas. En caso de los ríos y arroyos, que es de particular interés para este trabajo, se presenta una entrada de oxígeno dependiendo

de su morfología, ya que son elementos naturales que recogen aguas de una cuenca, y las transportan a una cierta desembocadura.

Cuando un cuerpo de agua recibe aguas residuales, este tiene cierta capacidad de asimilación y autodepuración, pero cuando ha perdido esta, ocurren una serie de reacciones donde se consume el oxígeno disuelto presente en el agua, y se propician condiciones anaerobias.

2.3. Dilución y Autodepuración de un Cuerpo de Agua

El concepto de dilución y autodepuración de un cuerpo de agua, se puede explicar a través de la *Curva de Oxígeno Disuelto*. En esta curva se observa que una descarga de agua residual disminuye la concentración de oxígeno disuelto por efecto de la oxidación de la materia orgánica (curva de oxidación); sin embargo, se presenta un efecto positivo de ingreso de oxígeno al cuerpo de agua por efecto ya sea de fotosíntesis y/o reaeración (curva de aireación) y la resultante de estos dos efectos es mostrada por la curva de pérdida neta de oxígeno, en donde se observa un punto crítico (menor concentración de oxígeno disuelto) Figura 3.

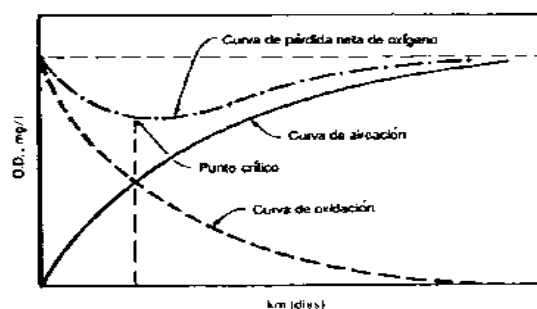


Figura 3. Curva de Oxígeno.

Fuente: Ramalho, 1983.

También se observa que la recuperación del río no es inmediata, sino que ésta se puede dar a kilómetros de distancia (o días) del punto donde es vertida el agua residual.

Aunado con la materia orgánica presente en la descarga de agua residual es la presencia de sólidos, los cuales además de consumir oxígeno, se depositan parcialmente en el fondo del

lecho con un espesor predominante cercano a la descarga, y que disminuirá gradualmente por efecto de arrastre y oxidación por la acción bacteriana.

2.4. Proceso de Transferencia de un Gas a un Cuerpo de Agua

La transferencia del oxígeno en el agua se presenta cuando existe insaturación de éste y se realiza por medio de su inserción en el seno del fluido. El mecanismo de transferencia del gas se explica con la **Teoría de la Doble Capa** (Whitman 1923, Lewis and Whitman 1924), que describe la existencia de dos capas (una líquida y otra gaseosa) formando una interface que es donde se presenta la resistencia al paso de las moléculas de gas al líquido. Esta resistencia depende principalmente de la temperatura, presión, turbulencia y contenido de contaminantes en el agua y su parámetro principal de medición es la solubilidad.

De acuerdo con mediciones realizadas, la temperatura del agua es inversamente proporcional con la solubilidad del oxígeno, por lo que a bajas temperaturas se presentará una alta solubilidad, mientras que a altas temperaturas la solubilidad es menor, llegando al límite de los 40 °C en donde el oxígeno disuelto es cero.

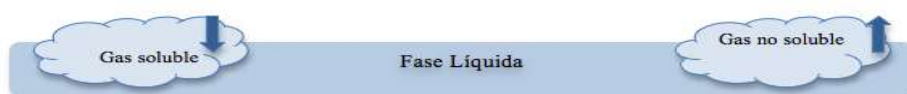


Figura 4. Resistencia de un Gas a Permanecer, o No, en Fase Líquida.

La presión atmosférica también limitará la entrada de moléculas de oxígeno al cuerpo de agua, ya que al disminuir la presión atmosférica (incremento sobre la altura sobre el nivel del mar), se tendrá menos oxígeno disponible, como lo muestra la Figura 5. Es dependencia de la solubilidad con la presión atmosférica puede ser explicada con la **Ley de Henry**, debido a que la concentración de Oxígeno Disuelto (OD) en la fase líquida es proporcional a la presión parcial del oxígeno en la fase gaseosa y puede ser evaluada con la Ecuación 1, en donde se considera la fracción molar del oxígeno en el aire ($Y_{O_2} = 0.21$; a nivel del mar).

$$\text{Presión parcial} = 0.21 (\text{Presión barométrica} - \text{Presión de vapor de agua}) \quad \text{Ecuación 1.}$$

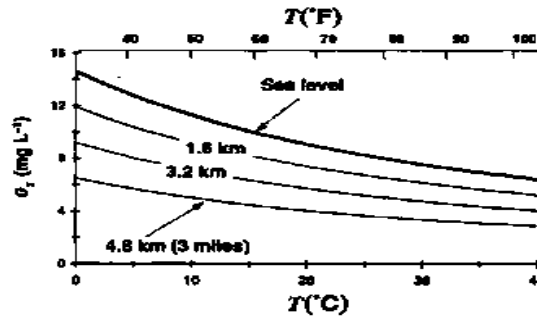


Figura 5. OD en Agua con Relación a la Elevación y Temperatura.

Fuente: Chapra, 1997.

Además de la temperatura y la presión, el mecanismo de turbulencia que se genere durante el proceso de transferencia será importante para determinar la velocidad a la cual entra el oxígeno al agua. El incremento en la turbulencia provoca que la resistencia de la película líquida vaya disminuyendo y como consecuencia la difusión del gas en el líquido se incrementa, lo que promueve la solubilización del Oxígeno en el agua.

La velocidad con que ocurre la transferencia de oxígeno se explica con la **Ecuación de Difusión de Fick**. Esta ecuación depende del tiempo y posición (xf), sin embargo se considera que el espesor de la película de líquido es mínimo, por tanto la ecuación se escribe:

$$dM/dt = DA [(C_s - C) / x_f] \quad \text{Ecuación 2.}$$

Donde dM/dt = velocidad de transferencia de oxígeno (mg de OD/ h), D = coeficiente de difusión (m^2/h), A = área de contacto superficial entre las fases líquida y gaseosa (m^2), C_s = Concentración de saturación de OD a condiciones de particulares de temperatura y presión (mg/L).

Dividiendo por el volumen:

$$dC/dt = D (A/V) [(C_s - C) / x_f] \quad \text{Ecuación 3.}$$

Se integra un coeficiente de difusión que determina con qué velocidad sucede el fenómeno. La

relación D/xf se puede expresar como K_L (coeficiente de transferencia de oxígeno), despreciando el espesor del líquido xf , que no siempre se conoce. La relación A/V es el área total de contacto interfacial por unidad de volumen, que también se puede representar como a (m^{-1}), esto debido a que no siempre se puede estimar el área interfacial A . Entonces la ecuación se establece de la siguiente manera:

$$dC/dt = K_L a (C_s - C) \quad \text{Ecuación 4.}$$

Donde C = concentración de OD en mg/L, dC/dt = gramos de oxígeno que se transfiere por unidad de tiempo por volumen, $K_L a$ = coeficiente de transferencia de oxígeno (h^{-1}) (Ramalho, 1983).

2.5. Aireación Inducida en Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales

La transferencia de oxígeno al agua, en ríos y arroyos, es un proceso importante debido a que el oxígeno ayuda a degradar los contaminantes orgánicos con la presencia de microorganismos aerobios. En los ríos se lleva a cabo dicha oxidación pero depende del proceso de reaeración; si el proceso es lento la oxidación tardará, ya que la disponibilidad de oxígeno limitará la actividad microbiana. En situación contraria, si la reaeración es rápida, la alta disponibilidad de oxígeno ayudará a eliminar a mayor velocidad el contaminante. Este es un proceso natural de purificación de cauces, ya antes dicho, que se ha visto limitado por el vertido de contaminantes, y es por ello que las aguas residuales se han colectado para luego llevarlas a PTAR's.

En las PTAR's se han empleado aireadores eléctricos para inducir la degradación de contaminantes del agua, y dichos equipos cumplen con dos propósitos principalmente:

1. Favorecer la transferencia de O_2 al sistema
2. Mantener un grado apropiado de movimiento o agitación, con el fin de lograr concentraciones de OD uniformes en todo el reactor.

El oxígeno se puede suministrar al agua por medio de dos formas de aireación (Bruce y col.,

2001): aireación difusa y aireación mecánica, en ambos sistemas se consume energía dependiendo el tipo de equipo y del volumen a tratar, y en general la mayor parte de energía consumida en una PTAR es a través del consumo y mantenimiento de estos sistemas.

2.5.1. Sistemas de Aireación Difusa

En este tipo de sistemas se hace pasar aire comprimido a través de difusores sumergidos y éste sube en forma de burbujas, por lo que para llevar a cabo este proceso es necesario contar con difusores porosos, difusores no porosos. El aire comprimido es forzado a través de los difusores porosos y logra formar burbujas pequeñas. En cambio, los difusores no porosos logran burbujas gruesas, pero su rendimiento de transferencia de masa es menor en comparación con los difusores porosos. Ambos tipos de difusores se utilizan más en tanques de flujo pistón y se colocan en el fondo del tanque de reacción (Bruce y col., 2001).

2.5.2. Sistemas de Aireación Mecánica

En este tipo de sistemas se hace uso de un mezclador mecánico para agitar vigorosamente la superficie del agua, lo cual promueve la transferencia de oxígeno de la atmósfera.

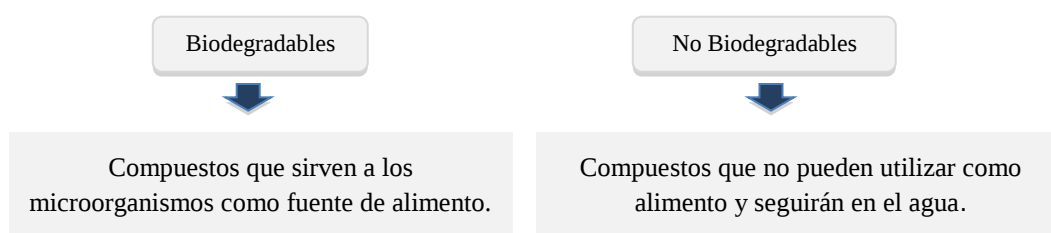
Se agrupan en cuatro tipos:

1. Flujo radial de baja velocidad. Sistemas empleados mayormente en sistemas de lodos activados. Tienen grandes álabes de turbinas que funcionan de 20 a 100 rpm, tienen buen rendimiento en la transferencia de oxígeno, capacidad de mezclado y fiabilidad.
2. Flujo axial de alta velocidad. Este tipo de aireadores se utiliza en balsas aireadas, donde el potencial de rotura del tamaño de floculo no es tan grande. Tiene álabes de turbinas más pequeños que los aireadores de baja velocidad, pero giran a mayores rpm. Tienen alta capacidad de transferencia de oxígeno, pero el mezclado es limitado y no son fiables.

3. Rotores horizontales. Este sistema tiene un eje horizontal y álabes radiales, los cuales agitan la superficie del tanque y el agua se mueve horizontalmente. Los rotores son simples y fiables, además dan buen rendimiento de transferencia de oxígeno, pero sólo aplica en tanques poco profundos, tales como las zanjas de oxidación.
4. Aparatos de aspiración. Estos sistemas arrastran aire por aspiración de una corriente fluida de agua bombeada, y por lo tanto la mezcla turbulenta entra al tanque de reacción.

2.6. Contaminantes en el Agua Residual

El agua residual lleva consigo una variedad de contaminantes que pueden reconocerse también como: contaminantes físicos, tales como la contaminación térmica, color, turbidez, espumas, radiactividad; químicos, como son compuestos orgánicos e inorgánicos; y biológicos, como son coliformes totales y fecales, además de microorganismos patógenos que transmite enfermedades como el cólera, tifoidea, etc. Es importante mencionar que ciertos contaminantes del agua también se pueden dividir en biodegradables y no biodegradables, tal como se muestra en el siguiente esquema:



Esquema de Clasificación Global de Contaminantes. *Fuente: IMTA, 2005.*

2.7. Parámetros de Calidad del Agua

Para la determinación de la calidad del agua se establecen parámetros físicos, fisicoquímicos y biológicos, basados en la composición química y biológica, con los cuales se muestran las

concentraciones de contaminantes de una muestra de agua en particular, Tabla 3 (IMTA, 2002).

Tabla 3. Parámetros de Calidad del Agua.

Características	
✓ Oxígeno Disuelto (OD)	✓ Nitrógeno Total
✓ Temperatura	✓ Fosfatos
✓ pH	✓ Dureza
✓ Conductividad	✓ Cloruros
✓ DBO	✓ Acidez
✓ DQO ó COT	✓ SAAM
✓ Sólidos	✓ Análisis Bacteriológico
✓ Color	✓ Alcalinidad
✓ Turbidez	✓ Grasas y Aceites

Las características enlistadas en la Tabla 3 son las más utilizadas para conocer la calidad del agua, y principalmente se toma en cuenta los parámetros directos como son el OD, la temperatura, pH y conductividad, que de manera general dan indicio de la existencia de vida acuática en el medio, y además se considera la caracterización de sólidos en todas sus formas, la DBO₅, o la DQO, que son parámetros que dan un diagnóstico particular de la naturaleza del contaminante en el agua. Con estos parámetros se puede determinar las características del agua y además se podrá valorar qué tipo de tratamiento puede ser viable para remoción de contaminantes.

2.7.1. Características Físicas

La temperatura es un parámetro importante por su efecto en otras propiedades, que influye en la aceleración de reacciones químicas, intensificación de sabores, olores y en la capacidad del cuerpo de agua en solubilizar el oxígeno.

La conductividad evalúa la capacidad del agua para conducir la corriente eléctrica y es una medida indirecta de la cantidad de iones en solución, fundamentalmente cloruros, nitratos, sulfatos, fosfatos, sodio, magnesio y calcio. La conductividad está asociada a la salinidad del

agua, la cual afecta a los seres acuáticos, deshidratando sus células y también disminuye la capacidad de solubilizar de oxígeno.

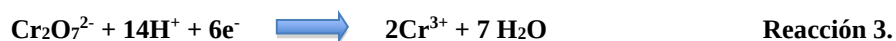
La presencia de sólidos modifica las propiedades físicas y químicas del agua, ya que afectan su tensión superficial, temperatura, turbidez, color y capacidad de solubilizar oxígeno. Estas afectaciones disminuyen el balance del oxígeno disuelto ya que puede ser consumido por bacterias, pérdida por incremento en la temperatura e inhibición del proceso fotosintético.

2.7.2. Características Químicas

El pH mide la concentración de iones de hidrógeno presentes en una solución, por lo que controla las reacciones químicas y la actividad biológica, ya que éstas dependen de éste parámetro.

La cantidad de oxígeno disuelto es uno de los indicadores más importantes de contaminación, debido a que toda vida acuática depende de la disponibilidad de este elemento, dado que los organismos aerobios sólo pueden vivir o desarrollarse en presencia de éste.

La demanda bioquímica de oxígeno (DBO) mide la cantidad de oxígeno que requieren los microorganismos en la descomposición de la materia orgánica y la demanda química de oxígeno (DQO) que mide la cantidad de oxígeno que se consume al oxidar la materia orgánica e inorgánica. Para este último parámetro se emplea principalmente el método de oxidación con dicromato, el cual se muestra en la Reacción 3.



2.8. Legislación Ambiental

Dentro de las acciones para el control de la contaminación en cuerpos de agua es importante considerar lo que establece La Ley de Aguas Nacionales (LAN), la cual menciona que para otorgar permisos de descarga de aguas residuales es necesario tomar en cuenta las Declaratorias de Clasificación de los cuerpos de agua de propiedad nacional. El Artículo 87 de

la LAN, contiene las Declaratorias de Clasificación y delimitación de los cuerpos de agua estudiados, en los que se determina la capacidad de asimilación y dilución de contaminantes; los parámetros de calidad que deberán cumplir las aguas residuales y los límites máximos permisibles de dichos parámetros en las áreas clasificadas, los cuales son la base para fijar condiciones particulares de descarga (SEMARNAT 2008).

La Ley Federal de Derechos, en el Artículo 278-B, menciona los límites máximos permisibles para cuerpos receptores, donde hace referencia a tres tipos de cuerpos de agua, Tipo A (Ríos, Aguas Costeras, y Suelo), B (Ríos, Embalses, Aguas Costeras, Estuarios, Humedales Naturales), y C (Ríos y Embalses), y es de hacerse notar que en los tres tipos se mencionan “Ríos”, con diferentes concentraciones permisibles para la DQO y SST, con lo cual se establece la capacidad de cada cuerpo de agua para asimilar contaminantes, Tabla 4.

Tabla 4. Límites Máximos Permisibles para Descarga en Cuerpos de Agua.

Límites Máximos Permisibles			
	Cuerpos Receptores		
	TIPO A	TIPO B	TIPO C
PARÁMETROS (miligramos por litro)	Ríos, Aguas Costeras, Suelo	Ríos, Embalses, Aguas Costeras, Estuarios, Humedales Naturales	Ríos y Embalses
	P.M.	P.M.	P.M.
SST	150	75	40
DQO	320	200	100

2.9. Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales se pueden clasificar en tratamientos primarios (físicos), secundarios (biológicos) y terciarios (avanzados), los cuales tratan los contaminantes en función de sus características, como se mencionará en breve.

2.9.1 Tratamientos Primarios / Físicos

Mediante el tratamiento primario, se remueven residuos sólidos de gran tamaño (bolsas, latas, botellas, etc.) y materiales como arena o grava que puedan afectar a sistemas de bombeo. Los tratamientos se dividen en:

- Flotación: remoción de sólidos suspendidos finos y partículas con densidad cercana al agua;
- Cribado: remoción de sólidos gruesos, finos y sedimentables por intercepción;
- Sedimentación: remoción de sólidos sedimentables y espesamiento de lodos;
- Triturado: trituración de sólidos gruesos a un tamaño uniforme;
- Homogenización: regulación de flujo y de la carga másica como DBO y sólidos suspendidos;
- Filtración: remoción de sólidos remanentes después de un tratamiento biológico o químico;
- Micro-tamizado: usado como filtración, en remoción de algas de lagunas de estabilización;
- Floculación: remoción de pequeñas partículas aglomeradas por coagulación que, por su peso sedimentarán en conjunto.

2.9.2 Tratamientos Secundarios / Biológicos

Actualmente los sistemas biológicos son los más utilizados por tener una alta capacidad de remoción de contaminantes orgánicos e inorgánicos, los cuales predominan en las descargas municipales, y se pueden dividir en aerobios y anaerobios:

- **Sistemas aerobios:** sistemas de tratamiento donde se requiere oxígeno para oxidar la materia orgánica. Como producto de ésta oxidación se obtiene CO_2 , H_2O , moléculas inorgánicas oxidadas y nueva biomasa. Los sistemas aerobios son sensibles a la falta de oxígeno, lo cual puede provocar la muerte de la biomasa.
- **Sistemas anaerobios:** Son sistemas de tratamiento donde los microorganismos transforman la materia orgánica a compuestos como CH_4 , H_2S y CO_2 , en ausencia de oxígeno. Este tipo de sistemas soportan altas cargas de contaminantes en el agua en comparación con los sistemas aerobios; además de que pueden sobrevivir en situación de falta de sustrato.

2.9.3 Tratamientos Terciarios / Avanzados

Los tratamiento avanzados se utilizan para dar pulimiento a las aguas residuales provenientes de los tratamientos secundarios y cuando se requiere de remover compuestos coloidales, sustancias tóxicas, persistentes y patógenos, que difícilmente pueden ser retirados mediante procesos biológicos.

- **Precipitación química:** remoción de sólidos suspendidos y fósforo, y remoción de metales pesados;
- **Desinfección:** destrucción de microorganismos patógenos;
- **Adsorción:** remoción de color y olor de aguas residuales. (Metcalf y Eddy, 2003).

Desde el punto de vista energético, conforme se va avanzando en el tipo de tratamiento es necesario el mayor uso de energía asociada a los sistemas de bombeo, agitación, aireación y desinfección.

2.10. Importancia de la Energía

La energía se define como la capacidad de generar trabajo y es un tema de gran importancia en la actualidad, porque tiene influencia sobre todas las actividades humanas y forma parte del desarrollo de las sociedades. Es por ello que se ha estudiado las diferentes formas de energía, tales como la energía cinética y energía potencial, para su aprovechamiento en el desarrollo de nuevas tecnologías.

La *energía cinética*, que se define como aquella que poseerá cualquier cuerpo como consecuencia de su movimiento, es una magnitud escalar y es una propiedad extensiva porque varía con la masa del cuerpo; y se expresa con la Ecuación 4:

$$E_k = \frac{1}{2} m u^2 \quad \text{Ecuación 4.}$$

Donde E_k = energía cinética (J), m = masa (kg), y u = velocidad (m/s).

Y si un fluido entra como la velocidad de flujo másico $\dot{m}$ (kg/s) a velocidad uniforme, entonces:

$$\dot{E}_k = \frac{1}{2} \dot{m} u^2 \quad \text{Ecuación 5.}$$

$\dot{E}_k$ (J/s) es la velocidad a la cual el fluido transporta la energía cinética al sistema.

La *energía potencial*, se define como la energía almacenada capaz de generar trabajo como consecuencia de la posición de un cuerpo, o de otro modo como la una medida del trabajo que un sistema puede entregar, y es una propiedad extensiva también; y se define con la Ecuación 6.

$$\dot{E}_p = \dot{m} g z \quad \text{Ecuación 6.}$$

Donde g = aceleración de la gravedad, z = altura del objeto por arriba de un plano de referencia y E_p = arbitrariamente es cero.

Pero si el fluido entra al sistema con velocidad de flujo másico $\dot{m}$ y elevación z en relación con el plano de referencia de energía potencial, entonces se define así:

$$\dot{E}_p = \dot{m} g z \quad \text{Ecuación 7.}$$

$\dot{E}_p$ = velocidad a la cual el fluido transporta la energía potencial gravitacional hacia el sistema.

La energía se transmite en forma de calor y de trabajo, como resultado de la diferencia de temperaturas entre el sistema y sus alrededores, y como energía que fluye en respuesta a cualquier fuerza impulsora que no sea una diferencia de temperatura, respectivamente.

El calor se expresa en unidades de kcal, cal ó Btu, y el trabajo tiene unidades de fuerza multiplicada por la distancia: joule (N*m), erg (dina*cm) y ft*lb_f, es una magnitud escalar y no es una propiedad del sistema ó del entorno.

La medición de la energía constan de un principio fundamental, ***Ley de Conservación de Energía*** (Primera Ley de la Termodinámica): que la energía no se crea ni se destruye, sólo se transforma.

$$\text{“Acumulación= entradas – salidas”}$$

La velocidad de transferencia de energía mediante trabajo se llama ***Potencia*** y se representa por ***W***. La velocidad de transferencia de energía por trabajo es igual al producto de las fuerzas por la velocidad en el punto de aplicación de la fuerza.

$$\underline{W} \text{ (J/s ó wattio) } = F * C$$

2.11. Tecnología de Molinos Hidráulicos para el Aprovechamiento de Energía

Al estudiar cómo poder controlar los ríos para el aprovechamiento de energía, se comenzó a desarrollar una serie de sistemas para embalsar el agua a través de presas y se dio paso a la creación de máquinas tales como los *molinos hidráulicos*.

El Molino es una estructura o elemento capaz de convertir la energía hidráulica en energía mecánica o de rotación, que mediante el giro de una gran rueda motriz o “turbina hídrica”, se activa un movimiento generado por una energía potencial y/o una energía cinética proveniente del cauce.

Hay dos tipos de molinos dependiendo de la posición de los ejes:

- Molinos que utilizan una rueda horizontal y un eje vertical (molinos griegos). Son los más antiguos y más sencillos; sin embargo, necesitan de una mayor velocidad del agua para moverlos.
- Molinos que usan una rueda vertical y un eje horizontal (molinos romanos). Son sistemas más complejos y necesitan engranajes para transferir la energía desde un eje horizontal a uno vertical. Las formas en las cuales se transforma la energía potencial y cinética, se muestran en la Figura 6.

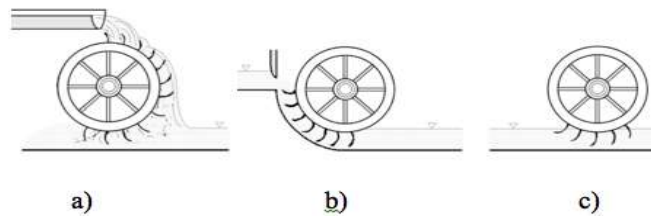


Figura 6. A) Rueda Movida por Arriba; B) Rueda Movida por el Costado; Y C) Rueda Movida por Debajo.

Una característica de los molinos de rueda vertical y eje horizontal es la de generar potencias bajas que suelen estar en el rango de los 5 a los 15 kW, las cuales se consideran bajas si se comparan con las potencias de varios cientos de MW conseguidas en las turbinas usadas en hidroeléctricas (Díez, s.f.).

2.11.1 Potencia Transmitida por un Eje

La potencia transmitida por un eje depende de la velocidad angular con la que gira, ω (rad/unidad de tiempo), del momento que ejerce sobre su entorno (τ) el cual se expresa en términos de la fuerza tangencial F_t y el radio R , $\tau = F_t R$ y de la velocidad en el punto de aplicación de la fuerza ($C = R \omega$). Parámetros que al correlacionarse se muestran en la ecuación 9 y permiten el cálculo de la correspondiente potencia (Michael & Howard, 2004).

$$\dot{W} = F_t C = (\tau/R) (R\omega) = \tau\omega \quad \text{Ecuación 8.}$$

3. ESTADO DEL ARTE

Debido a que generalmente en los procesos de tratamiento de agua residual es indispensable la introducción de oxígeno de manera artificial (aireación) para favorecer la oxidación de materia orgánica, es necesario el uso de turbinas para generar agitación en la superficie de tanques, las cuales requieren de energía eléctrica para ser movidas, lo que implica un costo asociado.

El consumo de energía en el tratamiento de aguas residuales ha ocasionado que el saneamiento de cuerpos de agua se vea limitado, por ello se han propuesto sistemas de tratamiento donde no requieren un consumo de energía eléctrico, ya que se puede emplear otras fuentes de energía, o también pueden combinarse ambas. Además, estos sistemas pueden ser instalados in-situ, haciendo uso de cualquier fuente de energía, lo que significa que no se hace uso de una instalación de colectores hacia un tratamiento puntual en una PTAR.

Una de las energías que se puede aprovechar es la eólica, donde se puede instalar *molinos de viento* para aireación de estanques de agua, y se propicia la circulación constante de temperatura, y el agua se mantiene limpia, con el beneficio de ahorro eléctrico y costos. Estudios demuestran que la aireación artificial proporcionada por este tipo de sistemas es rentable para mantener limpia el agua (© Aguamarket y Compañía Limitada).

Existen reportes donde se ha hecho uso de la aireación artificial para el mejoramiento de ecosistemas acuáticos, in-situ, como fue el caso en el Lago Amatitla en Guatemala, donde se instalaron aireadores que trabajaban con energía solar y eléctrica para enriquecer con oxígeno las aguas del lago. La instalación de los sistemas de aireación mejoró considerablemente la calidad del lago, reflejado en el incremento de la expectativa de vida de los peces y su crecimiento, debido a que se redujo la cantidad de materia orgánica y se disminuyeron los olores debido al ácido sulfúrico y mercaptanos (Pérez, 2007).

En el caso del Embalse Pao Cachinche, Edo. Carabobo en Venezuela, 2001, se buscó inducir una mezcla artificial para desestratificar el embalse y minimizar los efectos de la eutrofización a través de una red de difusores para inyectar aire comprimido. Posterior a la inyección del aire comprimido, se realizaron muestreos para determinar los cambios en el cuerpo de agua, encontrándose que se obtuvo la desaparición de la termoclina y se observó nuevamente la

aparición de especies del grupo de las cianobacterias, debido probablemente al restablecimiento de condiciones favorables de pH, luz y disponibilidad de nutrientes (Leni y Rodríguez, 2002).

Así también Taricska et al., 1986, habla del uso de aireación artificial dentro de ríos u arroyos, donde se buscaba devolver OD al agua instalando aireadores eléctricos a lo largo del cauce dependiendo de los niveles de OD. El aireador propuesto es de tipo “float-mounted”, trabajando en conjunto con un sistema “U-Tube” para distribución del aire, como se muestra en la Figura 7. El oxígeno se inyecta a una corta distancia respecto la superficie del agua, para luego observar que él hace un recorrido descendente por el sistema “U-Tube”.

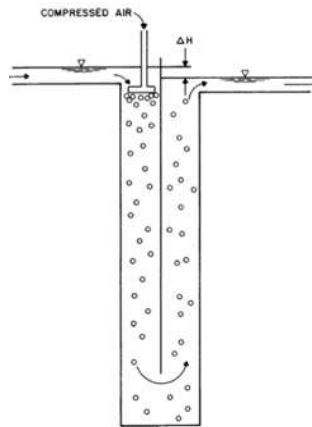


Figura 7. U- Tube Type Aeration System.

Otra forma de depuración del agua contaminada es la aireación natural, que se ha estudiado en ríos de Europa, Estados Unidos y Perú, por citar algunos casos, donde se han hecho mediciones para calcular la capacidad de asimilación de contaminantes, pero su aplicación debe tomarse con cuidado debido a que las condiciones hidráulicas varían, así como el grado de turbulencia, y puede limitar su validez y aplicación (Erazo y col., 2001).

Butts y Evans (1983) trabajaron en la caracterización de la turbulencia provocada por la presencia de cascadas y represas, obteniendo valores de coeficientes con el objeto de predecir el efecto sobre la reaeración (Chapra, 1997).

De manera natural se puede lograr la recuperación de los ríos y arroyos, esto donde exista una asimilación de oxígeno suficiente que va a depender de las siguientes características: interacciones cinéticas, condiciones turbulentas del flujo, temperatura, presión, geometría del cauce, cascadas, y otros, que favorecerán, el transporte de oxígeno (Oyarzún, 2004). Con tales características se logra la reaireación en un tiempo variable, cuyo fenómeno puede ser medido.

El cálculo de la tasa de reaireación permite conocer la velocidad con la cual el oxígeno de la atmósfera se incorpora al agua, y así determinar cuál es el perfil de oxígeno disuelto en la corriente. Chapra, 1997, menciona cuatro métodos para calcular esta tasa, tres de ellos se basan en un balance de masa y medición de oxígeno en campo. Un método de ellos es el denominado *Balance de oxígeno en estado estable*, que determina la ganancia o pérdida de oxígeno considerando los factores de aireación, producción, consumo por materia orgánica y sedimentos, y que pueden ser determinados directamente. El segundo método denominado *Desoxigenación con Sulfito de Sodio*, evalúa la reducción de la concentración de oxígeno por la adición de Sulfito de Sodio (Owens, 1964) y es utilizado principalmente en ríos con niveles bajos de contaminación. El tercer método denominado *Oscilación diurna de oxígeno*, utiliza datos obtenidos de las mediciones del crecimiento de plantas, las cuales provocan oscilaciones diurnas en los niveles de oxígeno.

El cuarto método consiste en la inyección de sustancias volátiles como trazador. Estos son compuestos gaseosos disueltos que se volatilizan de manera similar al oxígeno, no reaccionan, en bajas concentraciones son inofensivos para el ambiente y la salud, y el compuesto más empleado ha sido el Hexafluoruro de Azufre (SF_6) (Gélvez, y col., 2008).

Hoy en día, las características físicas de los cauces son muy diferentes, ya que han sido modificados y, prácticamente, muchos de ellos se utilizan sólo como destino final de descargas de aguas residuales. (Programa Hídrico Visión 2030 del Edo. De Michoacán de Ocampo, 2009).

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La contaminación de ríos y arroyos ha propiciado problemas serios a estos cuerpos de agua, favoreciendo el mal aspecto y malos olores que afectan la salud pública y de organismos vivos que habitan en estos ecosistemas.

En la actualidad, se cuenta con sistemas para abatir este problema ambiental; sin embargo, la capacidad instalada de PTAR's es insuficiente y las que existen en muchos de los casos, están fuera de servicio a causa de altos gastos de operación y mantenimiento por la energía eléctrica para bombeo y aireación (Programa Hídrico Visión 2030, del Edo. de Michoacán de Ocampo, 2009). Un problema adicional es de tipo constructivo debido a la errónea selección del área y el alto costo de adquisición y dificultad para comprar terrenos pertenecientes a ejidos.

Al presentarse dichas situaciones, es muy probable que no se logre avanzar en el saneamiento de arroyos y ríos de la manera deseada, ocasionando que se continúen dañando los ecosistemas.

JUSTIFICACIÓN

Debido a que los ríos y arroyos se ven seriamente afectados por las descargas puntuales y que, además, el saneamiento de los mismos ha sido difícil de alcanzar, se propone una alternativa de suministro de oxígeno a un río de bajo flujo, donde se propone aprovechar la energía hidráulica para transformarla en energía mecánica y así incrementar su capacidad de autodepuración. Todo ello con el fin de ahorrar energía eléctrica y evitar gastos de adquisición de terrenos para la construcción de la obra civil.

HIPÓTESIS

La colocación de un molino en un canal abierto de bajo flujo, suministrará el Oxígeno Disuelto suficiente al agua para propiciar el incremento en su calidad y la capacidad de autodepuración del cauce.

OBJETIVO GENERAL

Evaluar la capacidad de oxigenación de un sistema mecánico de molino, instalado en un canal abierto a escala piloto, para transferencia de Oxígeno Disuelto al agua.

Objetivos Específicos

- Construcción de prototipo a partir de un diseño de molino tipo vertical y eje horizontal.
- Medición de la capacidad de aireación del molino de agua.
- Evaluación del incremento en la autodepuración del agua.

4. METODOLOGÍA

La construcción de un prototipo de canal abierto e instalación de un sistema mecánico, se partió en base a una propuesta de dimensiones que se justifica con su fácil manipulación y control de un caudal bajo, para lo cual se hizo uso de un canal de 1 metro de longitud, en el que se colocó un tanque de aireación de 18L.

Una vez construido el prototipo de canal abierto y sistema de aireación se realizaron pruebas exploratorias para conocer el comportamiento del prototipo, esto considerando: aforos a diferentes condiciones de apertura del sistema de alimentación y bypass, utilizando una bomba sumergible de 0.4 L/s; ajuste y nivelación del sistema mecánico (sistema de aireación) para evitar fricción en el giro del eje; observación del nivel de agua sobre todo el canal cuando se activa la bomba para evitar inundación y fugas; colocación de un vertedor para definir un área de paso y velocidad del agua, y así aprovechar la energía potencial para hacer girar la propela; medición de las RPM (revoluciones por minuto) y potencia transmitida por el eje de la propela.

Al concluir las pruebas exploratorias antes mencionadas, se procedió a la evaluación de la capacidad de aireación en agua potable. Con el fin de evitar la interferencia del oxígeno disuelto (OD) proveniente en el agua potable, se realizó la adición del reactivo sulfito de sodio (Na_2SO_3), para de ésta manera iniciar la prueba con OD cercano a cero. Este procedimiento se basó en recomendaciones del método estandarizado de la ASCE publicado en 1984: “*A Standard For The Measurement Of Oxygen Transfer In Clean Water*”. El único efecto negativo de uso de Na_2SO_3 es el aumento en los sólidos totales disueltos en el agua (incremento en la conductividad), como resultado de la formación de sulfatos de sodio (Thermal Engineering LTDA).

De acuerdo a la reacción estequiometría (Reacción 4) se requieren 7.9 ppm para eliminar 1 ppm de O_2 , y se adiciona de un 10 a 20% en exceso de sulfito de sodio (Ramalho, 1983)



Reacción 4.

Al término de las pruebas con agua potable se trabajó con agua residual doméstica proveniente del Río Chiquito (Etapa 2), la cual fue tomada en el punto donde existe una **cascada**, en los meses de noviembre y diciembre, con muestras que se tomaron en el intervalo de 11:00 a 13:00 horas, teniendo en cuenta que este tipo de formas permite la entrada de oxígeno al río, y surge el interés de conocer la concentración de OD adquirida por acción de la cascada.

Para las pruebas de aireación en laboratorio fue empleado un volumen de agua residual de 19.5 L, la cual se mezcló con 60 L de agua libre de OD y 0.5 L de un consorcio bacteriano (Figura 8) proveniente de la PTAR de Atapaneo.



Figura 8. Lodos Microbianos.

Para la Etapa 1 se midieron los parámetros básicos de OD, temperatura, presión atmosférica y conductividad. Para la Etapa 2 se consideraron los parámetros anteriores, y además se midió el pH, se determinó la remoción de materia orgánica con la prueba de DQO, y los sólidos en todas sus formas. Se tomó una muestra al inicio de cada corrida y otra al final de la misma para medir parámetros, y en el caso particular de los sólidos sólo se tomó una muestra del agua al inicio de cada prueba (Tabla 5).

En el inicio de cada prueba, para ambas etapas, se llenaba lentamente de agua el canal abierto (embalse con 7.25 L, reactor con 18 L), evitando turbulencia para no permitir la entrada de oxígeno al agua.

Tabla 5. Variables a Medir para las Pruebas Exploratorias y Métodos de Análisis.

Variables a medir	Unidades	Frecuencia		Método de Análisis	Equipo
		Etapa 1	Etapa 2		
OD y presión atmosférica	mg/L	Cada corrida	Cada corrida	Directo, NMX-AA-012-SCFI-2001	Medidor de OD, HACH, sonda LDO101
Temperatura	°C	Cada corrida	Cada corrida	Directo, NMX-AA-007-SCFI-2000	Multiparamétrico, CONDUCTRONIC PC18
Conductividad	mS/cm	Cada corrida	Cada corrida	Directo, NMX-AA-093-SCFI-2000	Multiparamétrico, CONDUCTRONIC PC18
pH	Valor adimensional, 1-14	NA	Cada corrida	Directo, NMX-AA-008-SCFI-2011	Multiparamétrico, CONDUCTRONIC PC18
DQO	mg/L	NA	Cada corrida	Método digestión reactor (HACH)	Espectrofotómetro, HACH, DR/4000U
ST	mg/L	NA	Cada corrida	Gravimétrico, NMX-AA-034-SCFI-2001	Estufa de Secado/ Mufla
SVT	mg/L	NA	Cada corrida	Gravimétrico, NMX-AA-034-SCFI-2001	Estufa de Secado/ Mufla
SST	mg/L	NA	Cada corrida	Gravimétrico, NMX-AA-034-SCFI-2001	Estufa de Secado/ Mufla
SSV	mg/L	NA	Cada corrida	Gravimétrico, NMX-AA-034-SCFI-2001	Estufa de Secado/ Mufla
SDT	mg/L	NA	Cada corrida	Gravimétrico, NMX-AA-034-SCFI-2001	Estufa de Secado/ Mufla
Ssed	ml/L	NA	Cada corrida	Volumétrico, nmX-aa-004-scfi-2000	Cono Imhoff

Fuente: Elaboración propia.

4.1. Batería de Pruebas

Para ambas etapas se caracterizó la capacidad de aireación por parte de la propela, donde se trabajó con las siguientes variables:

- Caudal en el canal (L/s)
- Pendiente del canal (%)

Se establecieron 3 condiciones de flujo de agua (L/s) y cuatro condiciones de pendiente de canal (%), Tablas 6 y 7.

Tabla 6. Pruebas Exploratorias para Etapa 1.

	Pendiente 0%	Pendiente 1%	Pendiente 2%	Pendiente 3%
Q 1	E1 -1,0	E1 -1,1	E1 -1,2	E1 -1,3
Q 2	E1 -2,0	E1 -2,1	E1 -2,2	E1 -2,3
Q 3	E1 -3,0	E1 -3,1	E1 -3,2	E1 -3,3

Tabla 7. Pruebas Exploratorias para Etapa 2.

	Pendiente 0%	Pendiente 1%	Pendiente 2%	Pendiente 3%
Q 1	E2 -1,0	E2 -1,1	E2 -1,2	E2 -1,3
Q 2	E2 -2,0	E2 -2,1	E2 -2,2	E2 -2,3
Q 3	E2 -3,0	E2 -3,1	E2 -3,2	E2 -3,3

A cada recuadro se le asigna un nombre (Ejemplo: E1 – 1,0), de acuerdo a la etapa (E1-), caudal (1) y pendiente (0), respectivamente, con el fin de identificar cada corrida. La pendiente y caudal son factores o variables independientes, donde los tratamientos (E1 – 1,0) se forman por la combinación de los diferentes niveles de cada uno de los factores.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIONES

5.1. Construcción de Prototipo

Se construyó el prototipo de canal abierto en el cual se colocó un sistema mecánico de aireación (propela o molino de agua), cuyos detalles se muestran en la Figura 9 en la cual se observan cada uno de los elementos que componen el prototipo, además, se muestra la entrada y salida del agua hacia el canal abierto (representada por la línea azul). La descripción detallada de cada elemento del prototipo es descrito en la Tabla 8 de acuerdo a la numeración establecida en paréntesis.

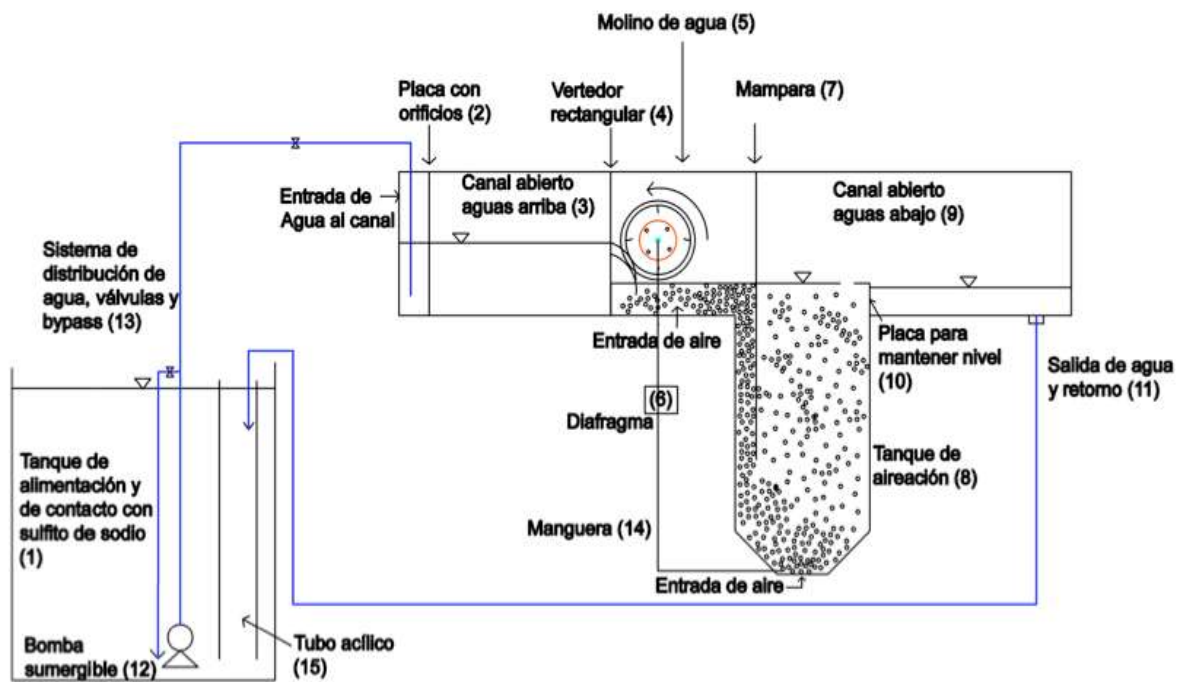


Figura 9. Prototipo de Canal Abierto, Diseño AUTOCAD 2013.

Tabla 8. Elementos del Prototipo de Canal Abierto.

#	Elementos del prototipo	Descripción
(1)	Tanque de alimentación y de contacto con Na_2SO_3	Tanque de acero, configuración circular y volumen de 64 L. Tanque de donde se alimenta el sistema y se lleva a cabo la reacción del agua con sulfito de sodio.
(2)	Placa de acrílico con orificios	Es una placa de acrílico (3 mm) de un área de 0.135 m x 0.20 m, la cual fue perforada con el objetivo de distribuir el agua de llegada de manera uniforme, para evitar turbulencia.
(3)	Canal abierto aguas arriba	El canal abierto se define por una longitud total de 1m; sin embargo, este se divide en aguas arriba y aguas abajo, dado que los separa una placa con un vertedor. La longitud de esta parte del canal es de 0.31 m, alcanzando un tirante aproximado de 0.12 m, y un volumen de 7 L.
(4)	Vertedor tipo *Triangular *Rectangular	Placa de acrílico, de 0.20 m de ancho, se coloca para embalsar el agua y medir el flujo que pasa a través de él. El paso del agua por el vertedor ocasiona una caída de ésta hacia el canal aguas abajo.
(5)	Propela	Propela de acero (conocida como siroco o ventilador de tiro forzado, que asemeja un molido de agua) con un diámetro de 0.11 m, perímetro 0.367 m, y 22 álabes. Se coloca sobre el canal, con ayuda de una serie de elementos tales como: • Eje de $\frac{1}{4}$ '' de diámetro y longitud de 0.32 m., en acero inoxidable A304. • 2 cajas de baleros o rodamientos. • Rieles de acero, 0.20 m. • Soporte de solera de 2'' x $\frac{1}{4}$'' y 1 $\frac{1}{4}$'' x $\frac{1}{8}$''. • Tornillos. La propela girará con la energía hidráulica y se transmitirá dicha energía de movimiento a una pequeña placa circular 0.051 m de diámetro. La pequeña placa tiene en sí 4 tornillos con imanes (de carga 1.5 kg.), con forma cilíndrica.
(6)	Diafragma	Elemento que se utiliza para transferir oxígeno del medio al tanque de aireación (8). Se colocó sobre un riel que puede ser movido para ser ajustado.
(7)	Mampara larga de acrílico	Esta placa tiene un área de 0.08 m ² (0.40 m de profundidad x 0.20 m de ancho), se coloca a medio canal con el fin de que el agua haga un recorrido en U, descendiente y ascendente, en el tanque aireación.
(8)	Tanque de aireación	Este tanque forma parte del canal abierto y tiene una profundidad de 0.36 m, con un volumen de 18 L, a propuesta.

(9)	Canal aguas abajo	Así como el elemento (3), el canal aguas abajo tiene una longitud de 0.69 m y un tirante de alrededor de 0.05 m; nótese que no se toma en cuenta la columna de agua que se forma con el tanque de aireación.
(10)	Placa de acrílico	Placa con un tirante de 0.04 m y ancho de 0.20 m, que sirve para mantener un embalse desde donde se ubica la propela hasta la salida del tanque de aireación.
(11)	Salida de agua y retorno	Es un orificio de 1 ½ '' en la base final del canal, con el fin de retornar el agua al tanque de alimentación. Se conectó a un tubo de PVC de 1 ½'', que regresaba el agua en forma de descarga ahogada, para así evitar turbulencia.
(12)	Bomba sumergible	Es una bomba de 0.4 L/s, como máximo flujo, que se coloca dentro del tanque de alimentación (1) para mantener circulando el agua y abastecer al canal abierto de la misma.
(13)	Sistema de distribución de agua, válvulas y bypass	Este se compone de una tubería de CPVC ½'', con 0.94 m de altura. Se colocaron 2 válvulas, una para la alimentación al canal y otra para regular los flujos de agua elegidos (bypass).
(14)	Manguera transparente	Manguera con una longitud de 0.78 m. de diámetro 0.5 cm., la cual conecta el diafragma (6) con el fondo del tanque de aireación.
(15)	Tubo de acrílico	Tubo de diámetro de 4'', colocado dentro del tanque de alimentación, que recibe una descarga ahogada de la recirculación del sistema.
(16)	Tina rectangular de plástico	Tina que se empleó para depositar agua y almacenarla en corridas posteriores. Con un volumen >60 L. Ver Figura 9.

El procedimiento de construcción se puede observar en el Anexo 8.2, y a continuación en la Figura 10 se presenta el prototipo ya concluido.



Figura 10. Prototipo de Canal Abierto.

5.1.1. Funcionamiento del Sistema Mecánico de Aireación y Generación de Energía

La instalación del sistema mecánico, conformado por una propela, eje y soporte, se muestra en el Anexo 8.2, y el funcionamiento del prototipo se puede describir a través de la Figura 11, donde se representa los procesos de transferencia de masa y energía.



Figura 11. Esquema General del Proceso de Transferencia de Masa y Energía.

Se puede observar en el esquema (Figura 11) que la energía potencial del agua embalsada (Figura 12) se transforma en energía de movimiento cuando ella golpea la propela, transformándose en trabajo. En ese punto, cuando gira la propela por acción de la caída del agua, se presenta una agitación superficial (Figura 13), en donde se hace posible la

transferencia de oxígeno de la atmósfera hacia el agua. Además de este hecho, se logra aprovechar la energía de movimiento de la propela para accionar un diafragma (*acoplamiento mecánico*), y así introducir burbujas al tanque de aireación (8), (Figura 14). Después de haber sido aireada el agua se retorna al tanque de alimentación (1).



Figura 12. Embalse de Agua en Canal Abierto.



Figura 13. Burbujas Provocadas por la Propela.



Figura 14. Acoplamiento Mecánico Eje-Diafragma.

En función del conocimiento respecto al comportamiento del sistema de canal abierto y

sistema mecánico se restableció la batería de pruebas que se presenta en la Tabla 9:

Tabla 9. Pruebas Finales para Etapa 1.

	Sin acoplamiento mecánico (*)			
	Pendiente 0%	Pendiente 1%	Pendiente 2%	Pendiente 3%
Q_1^*	E1 -1,0 *	E1 -1,1 *	E1 -1,2 *	E1 -1,3 *
Q_2^*	E1 -2,0 *	E1 -2,1 *	E1 -2,2 *	E1 -2,3 *
Q_3^*	E1 -3,0 *	E1 -3,1 *	E1 -3,2 *	E1 -3,3 *
	Con acoplamiento mecánico (**)			
	Pendiente 0%	Pendiente 1%	Pendiente 2%	Pendiente 3%
Q_1^{**}	E1 -1,0 **	E1 -1,1 **	E1 -1,2 **	E1 -1,3 **
Q_2^{**}	E1 -2,0 **	E1 -2,1 **	E1 -2,2 **	E1 -2,3 **
Q_3^{**}	E1 -3,0 **	E1 -3,1 **	E1 -3,2 **	E1 -3,3 **

Para este caso se plantearon dos modalidades de pruebas:

- ✓ Aireación superficial por el movimiento de la propela, “sin acoplamiento mecánico (*)”.
- ✓ Aireación superficial y uso de acoplamiento Eje-diafragma, “con acoplamiento mecánico (**)”.

Además, se estableció trabajar con cuatro pendientes de canal, de 0%, 1%, 2% y 3%, teniendo en cuenta que los cauces de bajo flujo tiene una inclinación ligera, y en cuanto los caudales elegidos se discutirá en el siguiente punto.

5.1.2. Alimentación de Agua al Canal Abierto

Para definir los caudales con los que se alimentó el sistema, se llevaron a cabo aforos con una bomba sumergible de 0.4 L/s, regulando la apertura de las válvulas de alimentación y bypass. Los resultados de éstas mediciones se muestran en la Tabla 10, en donde se observa que a válvula de alimentación completamente abierta el flujo es de 0.4 L/s y a válvula de alimentación 50% abierta y bypass 100 % abierto se obtuvo un flujo de 0.13 L/s.

Tabla 10. Aforos de Diferentes Condiciones de Apertura de Válvulas.

CONDICIÓN	Q (L/s)
Válvula de alimentación 100% abierta, bypass 0% abierto	0.40
Válvula de alimentación 100% abierta, bypass 50% abierto	0.39
Válvula de alimentación 100% abierta, bypass 100% abierto	0.22
Válvula de alimentación 50% abierta, bypass 100% abierto	0.13

Las corridas se realizaron con los caudales presentados en la Tabla 11, y se descartó la segunda condición (Válvula de alimentación 100% abierta, bypass 50% abierto), ya que se acerca mucho al valor del primer aforo. Los aforos se realizaron cuatro veces y se promediaron los valores obtenidos.

Tabla 11. Caudales Definidos para las Pruebas.

	Caudal (L/s)
Q ₁	0.13
Q ₂	0.22
Q ₃	0.40

5.1.3. Velocidades y Potencia Transmitida por el Eje de la Propela

Previo a las corridas finales, se llevaron a cabo pruebas entre un vertedor rectangular y un triangular para definir cuál de ellos promueve una mayor velocidad de flujo (Figuras 15 y 16), para lo cual se midió su área de paso para los tres caudales propuestos. Los resultados de estas áreas de paso se muestran en la Tabla 12, observándose en términos generales que el vertedor triangular presenta un área de paso menor en un 50% que el vertedor rectangular para los tres caudales.



Figura 15. Pruebas Exploratorias con Vertedor Rectangular.



Figura 16. Pruebas Exploratorias con Vertedor Triangular.

Tabla 12. Área de Paso para Vertedores (m²).

	P=0%	P=0%
	Rectangular	Triangular
Q = 0.4 L/s	0.00201	0.00127
Q = 0.22 L/s	0.00160	0.00083
Q = 0.13 L/s	0.00127	0.00056

Por lo anterior, existe una mayor velocidad de flujo a través del vertedor triangular, como lo establece la **Ecuación de Continuidad** (Ecuación 9), donde v = velocidad, Q = caudal y A = área de paso.

$$v = Q/A \text{ (m/s)}$$

Ecuación 9.

Teniendo en cuenta que la velocidad mayor se presenta con el vertedor triangular se decidió realizar las pruebas finales con él (Figura 17), dado que se midió una mayor velocidad del agua sobre éste, de 63% más para $Q=0.40$ L/s, de 52% más para $Q=0.22$ L/s y de 45% más para $Q=0.13$ L/s (Tabla 13). Aunado a la velocidad del agua, se presentan las RPMs generadas por la caída del agua, para cada condición de caudal y vertedor.

Tabla 13. Velocidades y RPM.

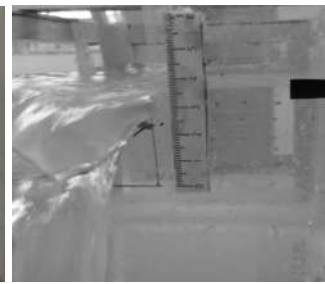
			P=0%		P=0%	
	Aforo	Canal aguas arriba	Vertedor Rectangular	Propela (7cm)	Vertedor Triangular	Propela (7cm)
	(L/s)	Vel (m/s)	Vel (m/s)	RPM	Vel (m/s)	RPM
Q₃	0.40	0.017	0.199	145	0.316	166
Q₂	0.22	0.010	0.138	132	0.267	149
Q₁	0.13	0.006	0.103	91	0.231	129



$Q_1 = 0.13 \text{ L/s.}$



$Q_2 = 0.22 \text{ L/s.}$



$Q_3 = 0.4 \text{ L/s.}$

Figura 17. Caudales.

De las pruebas de velocidad de agua contra las RPMs generadas, se observa que existe una correlación directa, ya que a mayor velocidad del agua hay mayor RPMs.

Habiendo establecido las condiciones de operación, tanto de flujo como del área de paso del agua por el vertedor, se iniciaron las pruebas en donde se variaban los flujos (Q) y las pendientes del canal (P) de acuerdo a la batería de pruebas finales (Tabla 9).

Los resultados de las pruebas de velocidad de flujo de agua y RPM para cada pendiente se muestran en la Tabla 14, en donde se observa en términos generales que la pendiente prácticamente no tiene influencia sobre la velocidad de flujo y RPMs, ya que se tiene una variación de 0.015 m/s, para las pendientes $P = 0\%$ y $P = 3\%$.

Tabla 14. RPM y Velocidades sobre el Vertedor.

	P=0%		P=1%	
Caudal	Vertedor Triangular	Giros	Vertedor Triangular	Giros
(L/s)	Vel (m/s)	RPM	Vel (m/s)	RPM
0.40	0.316	166	0.320	168
0.22	0.267	149	0.269	150
0.13	0.231	129	0.231	129
	P=2%		P=3%	
Caudal	Vertedor Triangular	Giros	Vertedor Triangular	Giros
(L/s)	Vel (m/s)	RPM	Vel (m/s)	RPM
0.40	0.326	168	0.331	174
0.22	0.273	150	0.276	156
0.13	0.238	129	0.238	132

Aunado a lo anterior, en la Figura 18 se graficó el comportamiento de la velocidad del agua que atraviesa el vertedor triangular vs el caudal para las cuatro pendientes propuestas (0%, 1%, 2% y 3%). En ésta se observa que la velocidad va en aumento conforme se incrementa el valor de la pendiente; sin embargo, esta variación no es significativa y no se refleja en las RPMs de la propela.

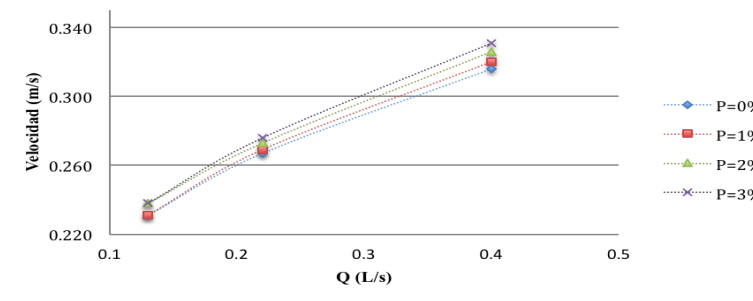


Figura 18. Velocidad a través del Vertedor vs Caudal.

En la figura 19 se representa la velocidad de paso por el vertedero contra las RPM que se presentan en la propela cuando ésta se encuentra acoplada y sin acoplar, para las pendientes de 0% y 3%. En términos generales se observa que las RPMs, son mayores cuando no se tiene acoplamiento. Para el rango de velocidades sobre el vertedor es de 0.316 a 0.331 m/s cuando

no se tiene acoplamiento se observa que las RPM de propela se encuentran entre 130 y 170. En el caso donde se tiene el acoplamiento, en el rango de velocidades es el mismo; sin embargo se ve una disminución en las RPMs, siendo en el intervalo de 130 a 150, también se observa que al intervalo de velocidad de 0.231 a 0.238 m/s, para $Q=0.13$ L/s en ambas pendientes de canal, las RPMs de la propela son nulas.

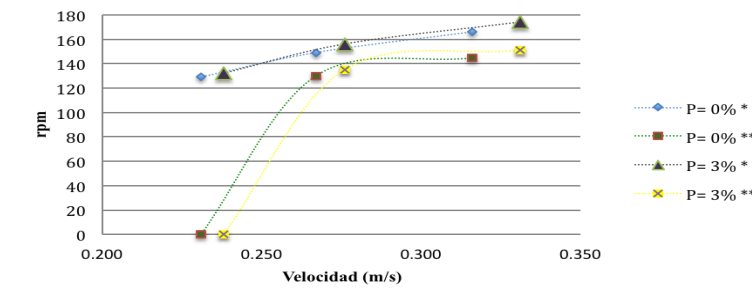


Figura 19. RPMs vs Velocidades a través del Vertedor.

Las RPMs medidas para todo el conjunto de corridas se citan en la Tabla 15, donde las RPMs con el uso del acoplamiento mecánico, disminuyen con respecto a aquellas corridas sin el uso de este acoplamiento, esto debido a que se tuvo una pérdida de energía por el uso del diafragma (6). En el caso del $Q= 0.13$ L/s (velocidad) se mostró una pérdida de un 100% para las cuatro pendientes de canal, en el cual la energía hidráulica no fue suficiente para mover la propela, y para el caso de $Q= 0.22$ L/s y 0.4 L/s la pérdida de energía fue en promedio de 13%, como se puede ver en la Tabla 16.

Tabla 15. RPM con y sin Acoplamiento.

	P=0%		P=1%		P=2%		P=3%	
	*	**	*	**	*	**	*	**
Caudal	RPM	RPM	RPM	RPM	RPM	RPM	RPM	RPM
Q = 0.4 L/s	166	145	168	145	168	145	174	151
Q = 0.22 L/s	149	130	150	130	150	130	156	135
Q =0.13 L/s	129	0	129	0	129	0	132	0

Tabla 16. % de Pérdida de Energía por Uso de Acoplamiento (Eje-Diafragma).

Caudal	P=0%	P=1%	P=2%	P=3%
Q = 0.4 L/s	12.7 %	13.7 %	13.7 %	13.2 %
Q = 0.22 L/s	12.8 %	13.3 %	13.3 %	13.5 %
Q =0.13 L/s	100 %	100 %	100%	100 %

Los valores obtenidos de RPMs se emplearon para el cálculo de la potencia o trabajo útil por parte del sistema mecánico utilizando la Ecuación 8 “Potencia Transmitida por un Eje” (Michael & Howard, 2004), expresándose estos en términos de la velocidad angular (ω), además se considera también los flujos de agua, el radio de la propela y el valor de la gravedad. Con estos datos se obtiene la Fuerza tangencial (Peso * gravedad) y la velocidad en el punto de aplicación ($C = R \omega$), donde el producto de ambos términos será el valor de la potencia, y dichos valores se observan en la Tabla 17.

$$W = F_t C = (\tau/R) (R \omega) = \tau \omega$$

Ecuación 8.

Dónde:

g = gravedad= 9.81 m/s ²	D = diámetro 0.11 m
Ft = peso* gravedad (kg*m/s ²) o (Newton)	R = radio 0.055 m
Ft = fuerza tangencial	τ = momento = Ft R (N*m)
ω = velocidad angular (rad/s) 1 rpm = 1 vuelta/min = 2π rad / 60 s = $2\pi/60$ rad/s = 0.105 rad /s	C = velocidad en el punto de aplicación de la fuerza = R ω W = potencia = (N*m) * (ciclos/s) = J/s =Watt

Tabla 17. Cálculo de la Potencia Transmitida por el Eje.

	Caudal (L/s)	Peso (Kg)	Ft (kg * m /s ²)	RPM	ω (rad/s)	τ (N* m)	P=0 % W (Watt)
Q ₁ *	0.13	0.13	1.28	129	13.545	0.070	0.950
Q ₂ *	0.22	0.22	2.16	149	15.645	0.119	1.857
Q ₃ *	0.4	0.4	3.92	166	17.43	0.216	3.762
Q ₁ **	0.13	0.13	1.28	0	0	0.070	0.000
Q ₂ **	0.22	0.22	2.16	130	13.65	0.119	1.620
Q ₃ **	0.4	0.4	3.92	145	15.225	0.216	3.286

							P=1 %
	Caudal (L/s)	Peso (Kg)	Ft (kg * m /s ²)	RPM	ω (rad/s)	τ (N* m)	W (Watt)
Q ₁ *	0.13	0.13	1.28	129	13.545	0.070	0.950
Q ₂ *	0.22	0.22	2.16	150	15.75	0.119	1.870
Q ₃ *	0.4	0.4	3.92	168	17.64	0.216	3.807
Q ₁ **	0.13	0.13	1.28	0	0	0.070	0.000
Q ₂ **	0.22	0.22	2.16	130	13.65	0.119	1.620
Q ₃ **	0.4	0.4	3.92	145	15.225	0.216	3.286
							P=2 %
	Caudal (L/s)	Peso (Kg)	Ft (kg * m /s ²)	RPM	ω (rad/s)	τ (N* m)	W (Watt)
Q ₁ *	0.13	0.13	1.28	129	13.545	0.070	0.950
Q ₂ *	0.22	0.22	2.16	150	15.75	0.119	1.870
Q ₃ *	0.4	0.4	3.92	168	17.64	0.216	3.807
Q ₁ **	0.13	0.13	1.28	0	0	0.070	0.000
Q ₂ **	0.22	0.22	2.16	130	13.65	0.119	1.620
Q ₃ **	0.4	0.4	3.92	145	15.225	0.216	3.286
							P=3 %
	Caudal (L/s)	Peso (Kg)	Ft (kg * m /s ²)	RPM	ω (rad/s)	τ (N* m)	W (Watt)
Q ₁ *	0.13	0.13	1.28	132	13.86	0.070	0.972
Q ₂ *	0.22	0.22	2.16	156	16.38	0.119	1.944
Q ₃ *	0.4	0.4	3.92	174	18.27	0.216	3.943
Q ₁ **	0.13	0.13	1.28	0	0	0.070	0.000
Q ₂ **	0.22	0.22	2.16	135	14.175	0.119	1.683
Q ₃ **	0.4	0.4	3.92	151	15.855	0.216	3.422

La influencia de los valores de las RPMs sobre la potencia transmitida observa mediante la Figura 20, donde se muestra que la potencia generada a ésta escala tienen un máximo del orden de 4 Watts; sin embargo para Q= 0.13 L/s, con acoplamiento mecánico, no se presenta la transferencia de energía para ninguna condición de pendiente de canal.

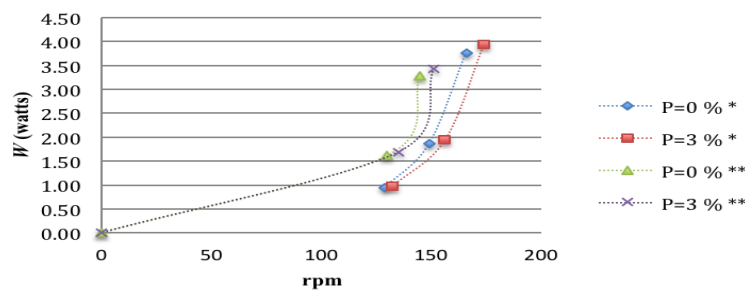


Figura 20. Potencia Transmitida por el Eje.

5.1.4. Tiempo de Retención Hidráulico (TRH)

El TRH define el tiempo que permanece el agua en el canal abierto ($TRH = \text{Volumen} / \text{Caudal}$), y es útil para conocer el tiempo de aireación del agua en el sistema. El tiempo de residencia se presenta para cada vertedor empleado en las pruebas exploratorias (Tabla 18), siendo de alrededor de 1 a 4 min en general. El TRH varía de un caudal a otro, así también de un vertedor a otro, siendo de 3% en promedio mayor el TRH del vertedor triangular respecto al vertedor rectangular, ya que se acumula un volumen mayor con el vertedor triangular.

Tabla 18. TRH en Cada Condición de Flujo y Vertedores.

TRH en todo el canal						
Caudal (L/s)	Volumen (L)			Volumen (L)		
	Rectangular	TRH (s)	TRH (min)	Triangular	TRH (s)	TRH (min)
0.40	28.4	71.1	1.2	29.3	73.4	1.2
0.22	27.7	125.8	2.1	28.7	130.5	2.2
0.13	27.2	209.1	3.5	28.1	215.9	3.6

En particular, en el tanque de aireación se presentó un TRH en el orden de 1 a 2 minutos (Tabla 19), aun y cuando éste tiempo es inferior con respecto al TRH que se tiene en las plantas de tratamiento aireadas (hasta 8 horas), el introducir el aire en el cuerpo de agua coadyuvará con su autodepuración.

Tabla 19. TRH en Tanque de Aireación.

	Caudal	Volumen	TRH	TRH
	(L/s)	(L)	(s)	(min)
Q₃	0.4	18	45.0	0.7
Q₂	0.22	18	81.8	1.4
Q₁	0.13	18	138.5	2.3

5.2. Resultados de la Etapa 1: Agua Potable

En este tema se describen los resultados obtenidos de los parámetros básicos medidos en las pruebas finales que incluye el OD, presión atmosférica, temperatura y conductividad, además se habla de la generación de burbujas que fueron observadas durante las pruebas.

5.2.1. Generación de Burbujas

El en proceso de aireación que se llevó a cabo se observaron burbujas de características variables. Las burbujas introducidas por el acoplamiento mecánico (**) tuvieron en promedio un diámetro de 0.5 cm (Figura 21) y velocidad de ascenso de 2.5 cm/s; sin embargo, es posible observar que la distribución de burbujas generadas, no abarca el área total del tanque, lo cual limitó su medición.



Figura 21. Tanque de Aireación y Burbujas en Ascenso.

En contraste, las burbujas provocadas por la agitación superficial (*) fueron fácilmente medidas con la sonda, ya que se dispersaron de manera homogénea en toda el área del tanque de aireación (8), por lo que se favoreció el con el agua. Estas burbujas tuvieron un diámetro ≤ 1 mm (Figura 22), con velocidades de ascenso variables e inferiores a 2.5 cm/s.

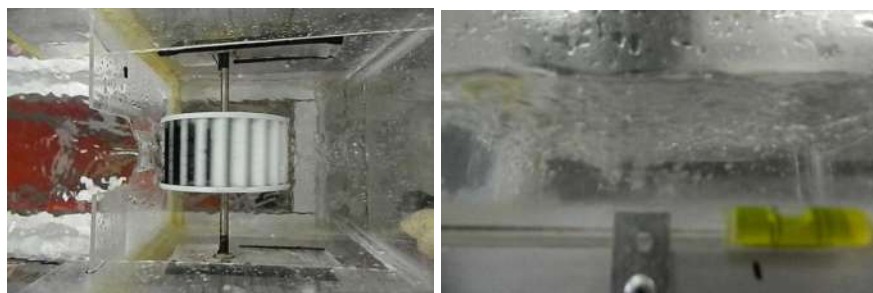


Figura 22. Burbujas dentro del Canal Medio.

La dispersión de burbujas dentro del tanque de aireación se inició en el volumen debajo de la propela (Figura 22), donde éstas lograron moverse de manera descendente en él (8), debido a la presencia de una mampara (7), que dividió a éste en dos áreas de paso diferentes (Figura 23) y que generó un cambio en la velocidad del agua. En la primer área de paso (área de paso 1) se presentó una velocidad del agua (velocidad 1) mayor en un 80% respecto a la velocidad en el área de ascenso (área de paso 2), como se puede observar en la Tabla 20. Un fenómeno asociado que se presenta a las áreas de paso, es que a menor área se tiene un movimiento de burbujas turbulento, en contraste con el área 2, donde las burbujas se movieron lentamente hacia la superficie del tanque, condición que provocó que las burbujas fueran distribuidas en todo el reactor aerobio.

Tabla 20. Velocidad del Agua en Tanque de Aireación.

	Caudal		área de paso 1	Velocidad 1	área de paso 2	velocidad 2
	(L/s)	m ³ /s	(m ²)	(m/s)	(m ²)	(m/s)
Q₃	0.4	0.004	0.0062	0.645	0.034	0.118
Q₂	0.22	0.00022	0.0062	0.035	0.034	0.007
Q₁	0.13	0.00013	0.0062	0.021	0.034	0.004

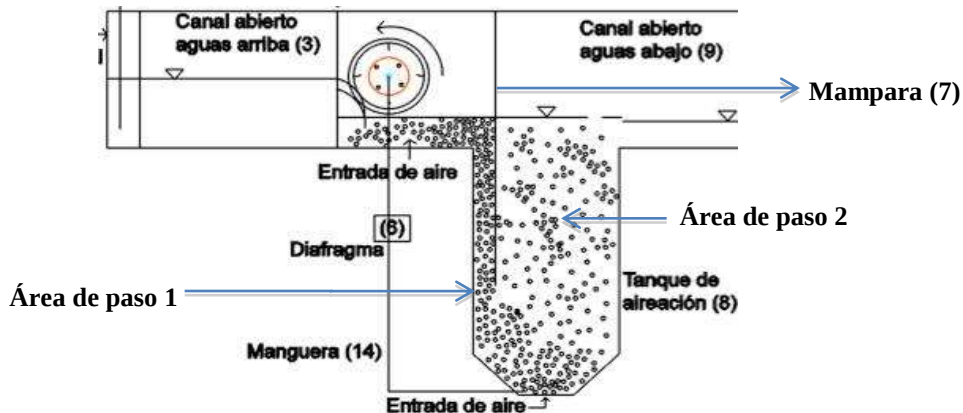


Figura 23. Áreas de Paso en Tanque de Aireación.

5.2.2. Oxígeno Disuelto

Dentro del prototipo construido, existen tres factores que impactan el suministro de oxígeno al agua dentro del canal, uno de ellos es la propela, otro es la cascada del embalse, las cuales introducen oxígeno por agitación y un acoplamiento mecánico, el cual inyecta aire al agua por medio de un diafragma.

Propela ()*

La medición del oxígeno disuelto se realizó en intervalos de 1 minuto, para todos los flujos, pendientes y considerando acoplamiento y sin éste. En primer instancia se muestran los resultados que obtuvieron sin acoplamiento para los flujos de 0.13 L/s, 0.22 L/s y 0.4 L/s.

En las mediciones que se realizaron para el flujo de $Q = 0.13$ L/s (Figura 24), se observó que el incremento de OD en el agua tiene un comportamiento lineal, para las cuatro pendientes del canal, sin presentar una dependencia relacionada con estas aun y cuando se observan diferentes niveles de asimilación de oxígeno; esto debido a que se tuvieron concentraciones de oxígeno disuelto inicial diferentes en cada corrida. También se puede observar que las

concentraciones finales de OD, oscilan entre 3 y 4 mg/L, para las cuatro condiciones de prueba.

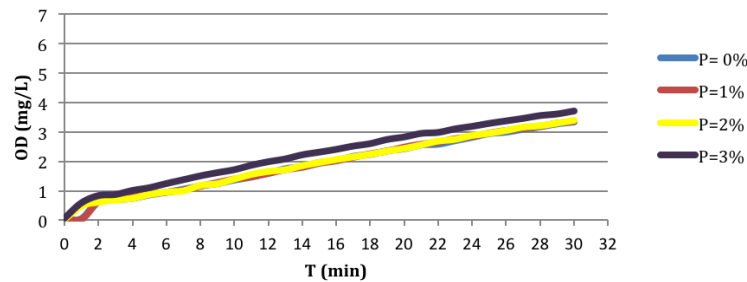


Figura 24. OD vs Tiempo para $Q = 0.13 \text{ L/s}^*$.

En las pruebas que se llevaron a cabo con el $Q = 0.22 \text{ L/s}$, se observa que el incremento de OD en el agua tiene un comportamiento exponencial, para todas las pendientes de canal empleadas, y prácticamente las líneas se superponen debido a que se tuvieron valores cercanos de OD en cada minuto de medición para todas ellas, como se muestra en la Figura 25. Las líneas curvas que se observan indican el acercamiento al valor de saturación de OD (6.7 mg/L), siendo de alrededor de 5 mg/L, para todas las condiciones de pendiente de canal.

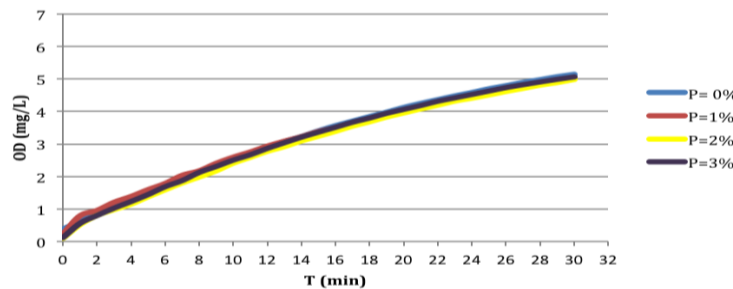


Figura 25. OD vs Tiempo para $Q = 0.22 \text{ L/s}^*$.

Las mediciones correspondientes para el flujo $Q = 0.40 \text{ L/s}$ (Figura 26), muestran que el incremento de OD en el agua tiene un comportamiento exponencial, para las cuatro pendientes del canal; si embargo, la curvatura de las líneas que se observa en estas pruebas es mayor en comparación con las obtenidas en $Q = 0.22 \text{ L/s}$, ya que se alcanza una concentración del orden de 6 mg/L lo que indica un acercamiento mayor a la concentración de saturación (6.7 mg/L).

Además se puede observar que debido a la condición de OD inicial, la cual no inicia en cero, existe un desplazamiento en las líneas de una pendiente a otra, situación que también se observó en las corridas de $Q=0.13$ L/s.

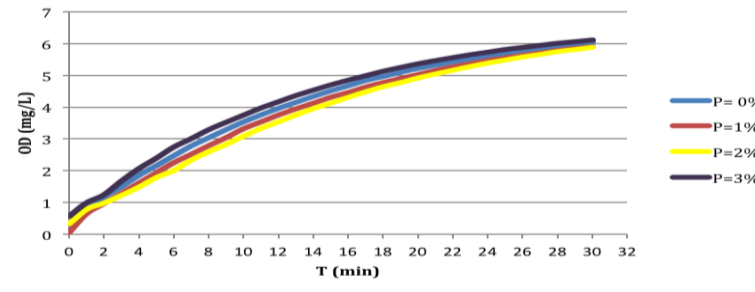


Figura 26. OD vs Tiempo para $Q = 0.4$ L/s *.

En la Figura 27 se presentan los datos del porcentaje de saturación de OD (% SAT), donde se observa en promedio un 52% de SAT para $Q=0.13$ L/s, un 75% de SAT para $Q=0.22$ L/s, y un 89% de SAT para $Q=0.40$ L/s.

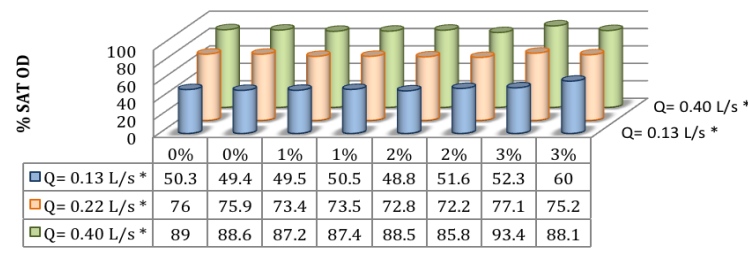


Figura 27. % SAT OD (*).

Propela y Acoplamiento Mecánico (**)

En cuanto a las mediciones de OD con el uso del acoplamiento mecánico, sólo se reportan valores para $Q = 0.22$ L/s y 0.4 L/s (Figuras 28 y 29, respectivamente) ya que para el caso del caudal más bajo no se presentó movimiento de la propela.

Las mediciones de la concentración de OD con el flujo $Q=0.22$ L/s, muestran que el

incremento de OD en el agua tiene un comportamiento exponencial, para todas las pendientes de canal empleadas y en este caso el valor de OD final para todas ellas se encuentra por debajo de 5 mg/L, como se observa en la Figura 28.

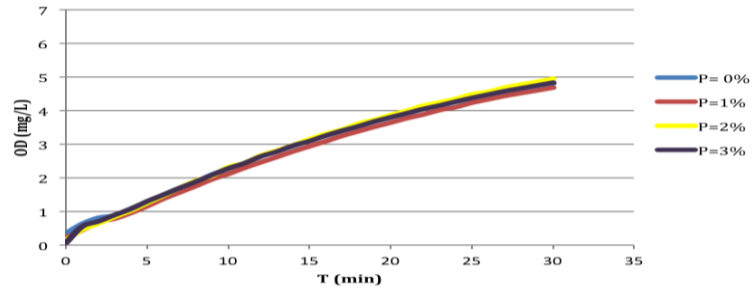


Figura 28. OD vs Tiempo para $Q = 0.22 \text{ L/s}$ **.

Finalmente se presentan las concentraciones de OD para el caso del caudal $Q=0.4 \text{ L/s}$ (Figura 29), donde se observa que el incremento de la concentración de OD respecto al tiempo tiene una tendencia exponencial en cada corrida, para las cuatro pendientes de canal, y en este caso la curvatura es mayor en comparación con las corridas del caudal medio ($Q=0.22 \text{ L/s}$) debido al acercamiento a la concentración de saturación, teniendo un valor final de OD por debajo de 6 mg/L.

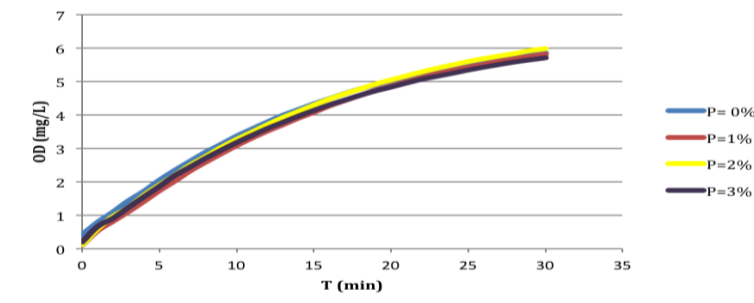


Figura 29. OD vs Tiempo para $Q = 0.4 \text{ L/s}$ **.

De forma general se observó que la pendiente del canal no mostró un cambio visible en la concentración de OD para cada intervalo de tiempo, además los valores obtenidos para el caso en el cual se realizaron pruebas con el acoplamiento mecánico, mostraron que los valores de

OD disuelto, son inferiores con respecto a la agitación superficial provocada exclusivamente por el movimiento de la propela. Esto puede ser atribuido a la disminución de las RPMs de la propela por efecto del frenado del acoplamiento mecánico.

En la Figura 30 , se presentan los datos del porcentaje de saturación de OD (% SAT), siendo 0% de SAT para $Q=0.13$ mg/L, de 71% de SAT para $Q=0.22$ L/s, y de 89% de SAT para $Q=0.40$ L/s.

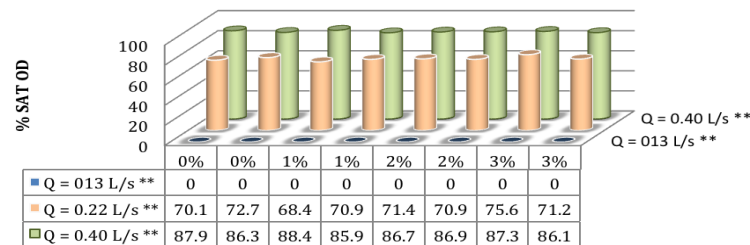


Figura 30. % SAT OD (**).

Cascada

En la Figura 31 se presentan las concentraciones de OD que se adquirieron considerando exclusivamente la caída de agua a través del vertedor, en donde se observa que para el caso de $Q=0.4$ L/s existe un comportamiento exponencial con respecto al tiempo, alcanzando un 73% de saturación de OD. Para $Q=0.22$ L/s la asimilación de OD tiene un comportamiento lineal alcanzando un 51% de saturación de OD. Para $Q= 0.13$ L/s también hay un comportamiento lineal alcanzando un valor de 37% de saturación de OD. Cabe hacer mencionar que solo se reportan valores para $P=3\%$, ya que se observó que con el cambio de pendiente del canal no hay variación en el OD.

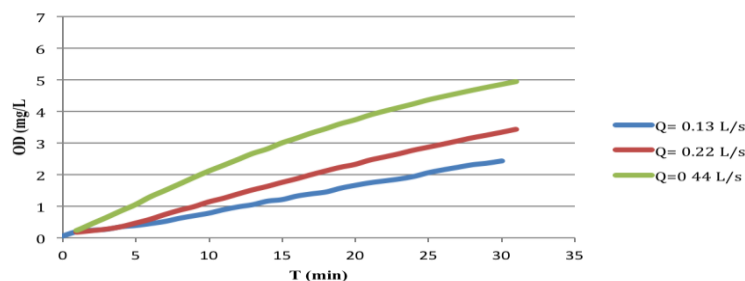


Figura 31. OD vs Tiempo (Cascada en Canal Abierto).

Los porcentajes de saturación de OD medidos en las pruebas con la cascada, son menores en comparación con los obtenidos en las corridas con el uso de la propela y del acoplamiento mecánico (Eje-diafragma), valores que se muestran en la Tabla 21, con respecto a cada flujo y cada modalidad establecida, (*) y (**).

Tabla 21. Comparativa de Asimilación de OD.

Flujo	cascada % SAT	% de SAT (*)	% de SAT (**)
Q= 0.13 L/s	37	52	0
Q= 0.22 L/s	51	75	71
Q= 0.40 L/s	73	89	89

Para el caso de $Q=0.4$ L/s se presenta un 16% (*) y 14 % (**) menos de saturación de OD con respecto a la cascada; para $Q=0.22$ L/s se presenta un 24% (*) y un 21% (**) menos de saturación; y para $Q=0.13$ L/s se presenta un 15% (*) menos de saturación de OD, y en particular para (**) no existió una entra OD, por lo tanto en este caso la entra de OD al agua por medio de la cascada es mayor en 37% con respecto al uso del acoplamiento mecánico.

5.2.3. Temperatura

La temperatura fue un parámetros de control importante para toda la batería de pruebas, ya que influye de manera directa en la asimilación de OD al agua, por lo tanto, se mantuvo una temperatura inicial (T inicial $^{\circ}\text{C}$) en un intervalo de 20 a 22°C para el agua potable (T blanco).

Se tomó lectura de la temperatura con la Sonda LDO101, obteniendo los resultados que se presentan en la Figura 32.

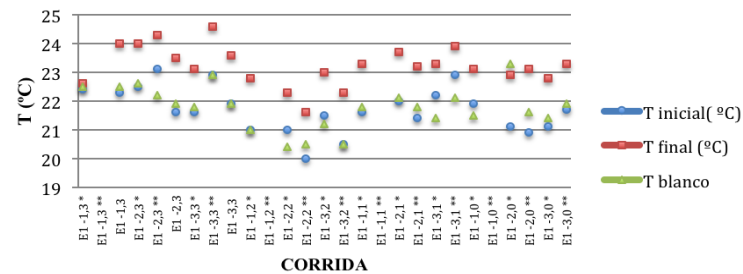


Figura 32. Temperatura.

Al concluir cada prueba se observó que la temperatura final en términos generales se incrementó en 2 grados centígrados debido al calentamiento de la bomba sumergible, lo cual influye en la asimilación de OD; sin embargo esta variación no representó problema, dado que la variación fue menor a 1mg/L, para el intervalo de 22 a 24 °C respectivamente, como se observar en la Figura 33.

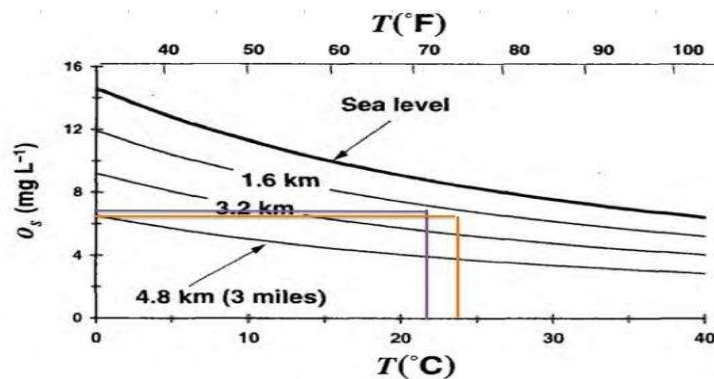


Figura 33. Curva de Saturación de OD.

Fuente: Chapra, 1997. Modificada, Marcada a 1.9 km, 22 y 24 °C.

5.2.4. Conductividad

La conductividad es un parámetro de control importante debido a que se asocia a la presencia de sales disueltas en el agua (salinidad), las cuales afectan la asimilación de OD, como se muestra en la Tabla 22 que por cada unidad de conductividad (ms/cm) que se incrementa se presenta también una mayor salinidad (ppm).

Tabla 22. Relación entre la Conductividad y Salinidad.

Conductividad ms/cm	salinidad ppm
5	3
6	4
7	4
8	5
9	6
10	6
11	7
a 20°C	

Fuente: Sension6 Portable Dissolved Oxygen Meter, Instruction Manual. National Institute of Oceanography of Great Britain, 1971.

Para éste estudio en particular, la conductividad se incrementa con la adición del sulfito de sodio, reactivo que fue necesario adicionar para consumir el OD presente en el agua potable (reacción), obteniendo mediciones en el intervalo de 0.65 - 1.03 ms/cm, como mínimo y máximo (Figura 34), siendo valores por debajo de los presentados en la Tabla 22, por lo que no se considera que los resultados sean un factor que afecta la solubilidad del oxígeno en el agua.

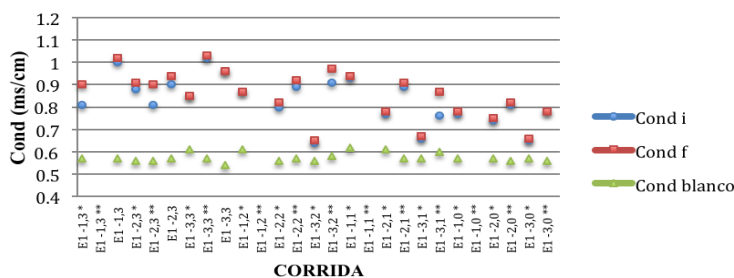


Figura 34. Conductividad.

5.2.5. Presión Atmosférica

La presión atmosférica es importante porque define la concentración de saturación de OD en el agua (Figura 35), ésta presión se puede considerar constante para el sitio donde se realizaron las pruebas, con un valor promedio de 608 mmHg a 1904 metros sobre el nivel del mar, para la cual se tiene un valor de saturación de OD de 6.7 mg/L, a 23°C. Las variaciones de la presión atmosférica se muestran en la figura 34, en la cual observa que el valor mínimo se encuentra en 606 mm Hg y el valor máximo es de 611 mm Hg.

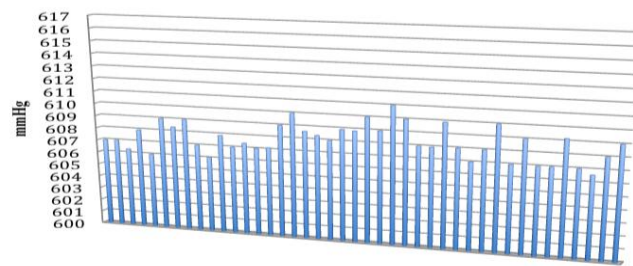


Figura 35. Presión Atmosférica.

5.2.6. Coeficientes de Transferencia de Oxígeno ($K_L a$), en Etapa 1

Tomando como base los gráficos de OD en el agua para las diferentes condiciones de prueba se observó que para el flujo de $Q=0.13$ L/s, se presentó un comportamiento lineal, lo cual corresponde con una ecuación de orden cero, mientras que para los flujos de $Q=0.22$ L/s y $Q=0.4$ L/s, se presentó un comportamiento exponencial que corresponde con una expresión de primer orden. Las ecuaciones para el cálculo parten del siguiente planteamiento:

$$dC/dt = -k C^n \quad \text{Ecuación 9.}$$

Donde dC/dt = variación de la concentración de OD respecto al tiempo, k = pendiente o velocidad de transferencia de masa ($K_L a$), C = concentración de OD, n = orden de la ecuación ($n=0$ y $n=1$). Si $C=C_0$ en $t=0$, se podrá integrar por variables separables:

$$C = C_0 - k t \quad \text{cuando } n=0 \quad \text{Ecuación 10.}$$

$$C = C_0 e^{-kt} \quad \text{cuando } n = 1 \quad \text{Ecuación 11.}$$

Se despeja k ($K_L a$) de las Ecuaciones 10 y 11, respectivamente:

$$K_L a = (C_0 - C) / t \quad (\text{Masa/Volumen} \cdot \text{Tiempo}) \quad \text{Ecuación 12.}$$

$$K_L a = 2.303 \log [(C_s - C_0)/(C_s - C_2)] / (t_2 - t_0) \quad (\text{Tiempo}^{-1}) \quad \text{Ecuación 13.}$$

Donde C_s es la concentración de saturación a 23°C y 608 mmHg para las condiciones de trabajo en el laboratorio (Tabla 23), C_0 es la concentración inicial de OD (mg/L), y C_2 es la concentración final de OD.

Tabla 23. Temperatura y Concentración de Saturación de OD.

	T inicial	T final	T prom	Cs (mg/L)
Etapas 1	22	24	23	6.7
				A 608 mmHg

Los coeficientes de difusión obtenidos se ajustaron a 20°C con la *Ecuación de Arrhenius* (Ecuación 14).

$$k(T) = k(20) \theta^{T-20} \quad \text{Ecuación 14.}$$

Donde $k(T)$ = coeficiente de difusión a 23°C, $k(20)$ = coeficiente de difusión a 20°C, $\theta = 1.024$ (para reaeración de oxígeno), y $T=23^\circ\text{C}$.

En la Tabla 24 se muestran los resultados del cálculo de los coeficientes de difusión, que representan la concentración de OD que entra al agua por unidad de tiempo, en ésta se observa que existen dos tipos de unidades ($\text{mg/L} \cdot \text{min}$ y min^{-1}) que corresponden a los comportamientos lineal y exponencial respectivamente.

Los datos se clasifican según el caudal empleado, $Q=0.13 \text{ L/s}$, $Q=0.22 \text{ L/s}$ y $Q=0.40 \text{ L/s}$, y a su vez, dentro de la tabla correspondiente a cada caudal, se dividen conforme la modalidad de trabajo (*), (**) y cascada de canal, para las temperaturas de 23°C y 20°C.

Tabla 24. Coeficientes de Transferencia de Oxígeno para Etapa 1.

Q = 0.13 L/s			K _L a (mg/Lmin)	
Modalidad	(*)		(**)	
Temperatura	A 23 °C	A 20°C	A 23 °C	A 20°C
P= 0%	0.098	0.091	Sin movimiento	Sin movimiento
P= 1%	0.098	0.091	Sin movimiento	Sin movimiento
P=2%	0.100	0.093	Sin movimiento	Sin movimiento
P=3%	0.105	0.098	Sin movimiento	Sin movimiento
Modalidad	Cascada en canal	Cascada en canal		
P=3%	0.080	0.075		

Q= 0.22 L/s			K _L a (min ⁻¹)	
Modalidad	(*)		(**)	
Temperatura	A 23 °C	A 20°C	A 23 °C	A 20°C
P= 0%	0.034	0.032	0.041	0.038
P= 1%	0.043	0.040	0.037	0.037
P=2%	0.044	0.041	0.044	0.041
P=3%	0.046	0.042	0.042	0.039
Modalidad	Cascada en canal	Cascada en canal		
	(mg/Lmin)	(mg/Lmin)		
P=3%	0.114	0.106		

Q= 0.4 L/s			K _L a (min ⁻¹)	
Modalidad	(*)		(**)	
Temperatura	A 23 °C	A 20°C	A 23 °C	A 20°C
P= 0%	0.075	0.070	0.067	0.062
P= 1%	0.070	0.065	0.067	0.063
P=2%	0.070	0.065	0.074	0.069
P=3%	0.078	0.072	0.062	0.058
Modalidad	Cascada en canal	Cascada en canal		
P=3%	0.044	0.041		

De acuerdo con los resultados de las corridas “OD vs Tiempo” para las diferentes condiciones, se observó que en términos generales éstas siguen un comportamiento de primer orden, excepto para cuando se tiene un flujo de 0.13 L/s (flujo mínimo) que se observó un comportamiento lineal, con lo cual se encontraron en el intervalo de 0.091 a 0.098 (mg/Lmin), a 20°C.

Para las corridas en las cuales se presentó un comportamiento exponencial se tuvieron coeficientes de transferencia en el intervalo de 0.032 1/min a 0.072 1/min, a 20°C. Cabe hacer mención que no existió una diferencia significativa cuando no se tiene el acoplamiento a cuando sí se tiene (Figura 36).

Para el caso particular de los datos obtenidos con la cascada del canal, el comportamiento fue lineal para la $Q=0.13$ L/s y $Q=0.22$ L/s, en el intervalo de 0.075 a 0.106 (mg/Lmin), y para $Q=0.40$ L/s el comportamiento fue exponencial con un rango de 0.041 1/min, a 20°C.

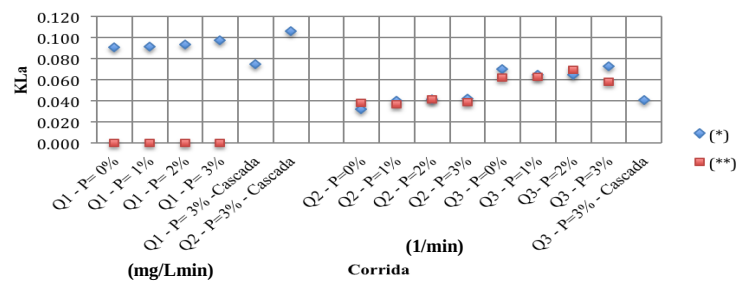


Figura 36. Velocidades de Transferencia de Oxígeno a 20°C.

5.3. Resultados de la Etapa 2: Agua Residual

En la presente sección se aborda los resultados de los parámetros medidos del agua residual, que incluye el OD, temperatura, conductividad, pH, DQO y Sólidos en todas sus formas. Se da inicio con resultados de la caracterización de una **cascada** ubicada en el sitio de muestreo (Río Chiquito), considerando el aporte de OD y remoción de DQO, para luego dar paso a los resultados de las pruebas de la Etapa 2 en el laboratorio.

5.3.1 Caracterización de una Cascada sobre el Río Chiquito y Muestreo de Agua Residual

En el sitio de muestreo se realizaron mediciones de temperatura, conductividad y pH, y a su vez se midió la capacidad de aireación por parte de una **cascada** ubicada en este sitio, a través de la medición del oxígeno disuelto que ésta aporta al agua, obteniendo valores en el intervalo de 3.5 a 4 mg/L (50% de saturación de OD), lo que representa un 40% más de OD aguas abajo la cascada (OD final), partiendo de una concentración OD inicial menor a 1 mg/L aguas arriba la cascada (Figuras 37 y 38).

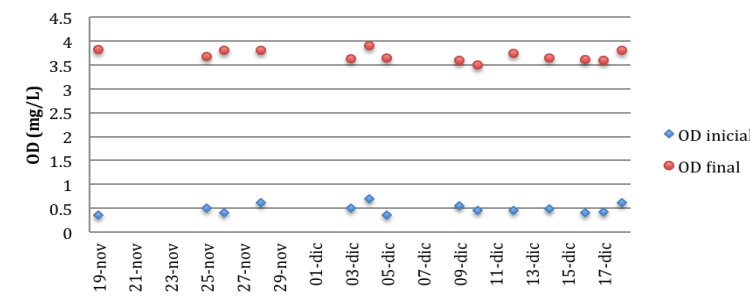


Figura 37. OD en Cascada Río Chiquito.

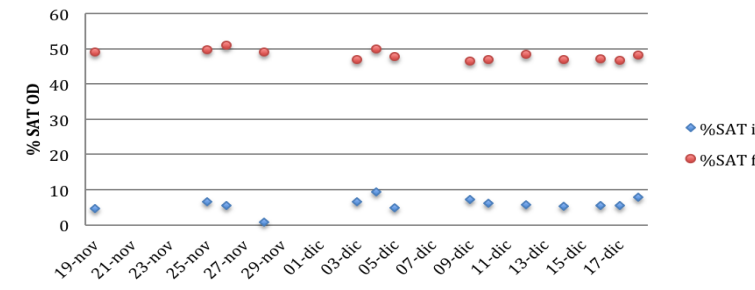


Figura 38. % SAT OD en Cascada Río Chiquito.

En cuanto a la medición de la temperatura en el río se presentó una variación conforme se acercaba el mes de diciembre, y fue descendiendo de 19 °C a 16°C, como se muestra en la Figura 39. Al presentarse esta disminución en la temperatura, no se observa un aumento en la concentración de OD a pesar de que la solubilidad del gas se incrementa.

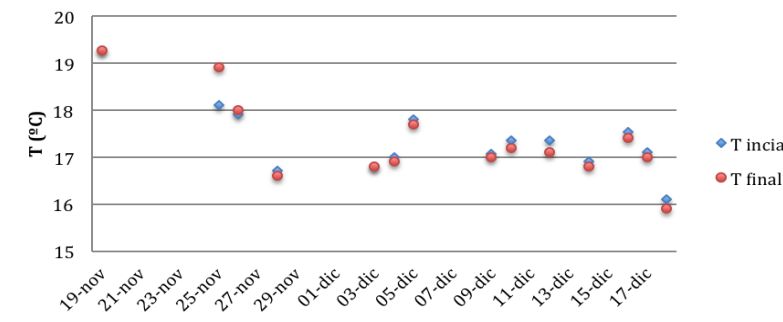


Figura 39. Temperatura en Cascada Río Chiquito.

Otra condición que afecta a los ríos es el pH, debido que a limita la supervivencia de muchas especies acuáticas si se tienen valores ácido ó básicos, por lo cual es un parámetro importante de control. El pH en este punto del río se encontró alrededor del valor neutro, en el intervalo de 6 a 8 (adimensional), aguas arriba de la cascada (pH inicial) y aguas abajo de ella (pH final), Figura 40; aún con ello no se observaron especies acuáticas a causa de la ausencia de OD, haciéndose presentes únicamente microorganismos anaerobios y facultativos.

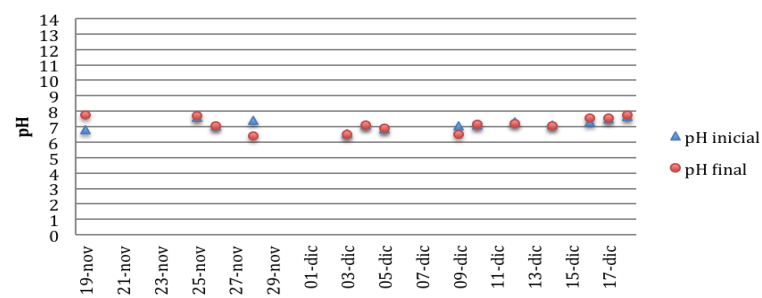


Figura 40. pH en Cascada Río Chiquito.

Con respecto al parámetro de conductividad, la medición de éste se encontró en el rango de 0.3 ms/cm en promedio, aguas arriba y aguas debajo de la cascada, por lo que no se consideró un problema que afecte la solubilidad del oxígeno en el agua, Figura 41.

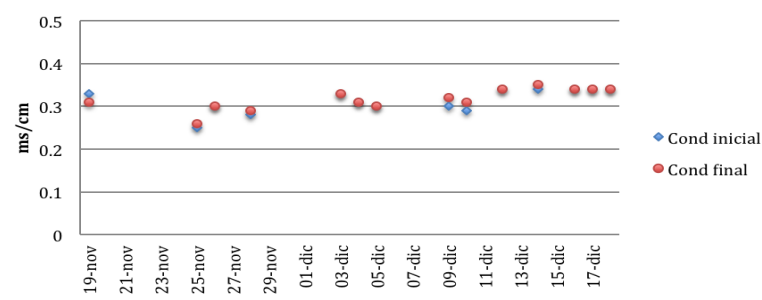


Figura 41. Conductividad en Cascada Río Chiquito.

Con respecto a las mediciones de la DQO, muestran de manera indirecta la concentración del oxígeno que se requiere en la oxidación de la materia orgánica e inorgánica presente en el agua. Las concentraciones medidas para éste parámetro fueron en promedio de 80 mg/L (aguas arriba y abajo de la cascada), presentándose, en el 80% de los casos, una concentración mayor en aguas abajo de la **cascada**, con respecto a la muestra aguas arriba de ésta, lo cual puede atribuirse al arrastre y resuspensión de sólidos sobre el río. Aunado a lo anterior, en este punto del río la concentración de DQO se puede considerar baja, ya que ha transcurrido un tiempo desde el sitio de descarga del agua residual, por lo que ya se degradó parte de la materia contaminante, y por ende el OD presente llega a ser menor 1 mg/L (Figura 42).

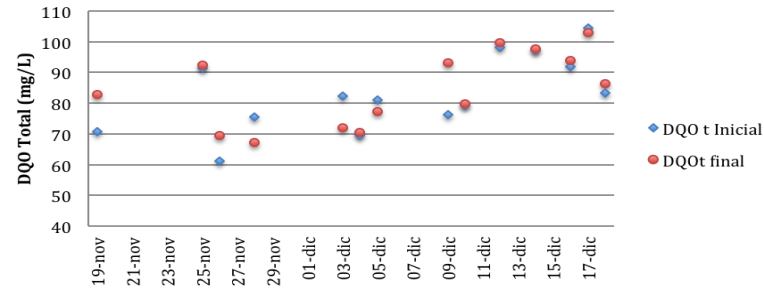


Figura 42. DQO total en Cascada Río Chiquito.

Al concluir el muestreo del agua residual, ésta fue llevada al laboratorio y se realizaron las corridas que se presentan en la Tabla 25, en función de los resultados de la Etapa 1, donde no se observó que el uso del acoplamiento mecánico y la variación de la pendiente de canal tuvieran un efecto mayor en la asimilación de OD.

Tabla 25. Pruebas Finales para Etapa 2.

	Sin acoplamiento mecánico (*)	
	Pendiente 0%	Pendiente 3%
Q = 0.13 L/s	E2 -1,0 *	E2 -1,3 *
Q = 0.22 L/s	E2 -2,0 *	E2 -2,3 *
Q = 0.4 L/s	E2 -3,0 *	E2 -3,3 *

Velocidades en Río Chiquito vs Velocidades del Agua en Canal Aguas Arriba

Las velocidades del agua que se obtuvieron con el prototipo de canal abierto (Tabla 26) fueron inferiores a las velocidades medidas en el Río Chiquito (Tabla 27), siendo en el intervalo de 0.006 m/s – 0.02 m/s para los tres caudales empleados, con lo que es posible considerar una mayor generación de energía, adecuando un sistema mecánico apropiado para tal fin.

Tabla 26. Velocidades del Agua en Canal Aguas Arriba.

Caudal	Velocidad
	0.02 m ²
Q = 0.4 L/s	0.02 m/s
Q = 0.22 L/s	0.01 m/s
Q = 0.13 L/s	0.006 m/s

Tabla 27. Velocidades Máxima y Mínima Observadas en Río Chiquito.

Lluvias	Máximo observado:	1.3 m/s
Estiaje	Mínimo observado:	0.15 m/s

Fuente: Estudio de Doctorado; Modelación del Río Chiquito de Morelia, M.C. Juan Carlos Correa G.

5.3.2 Oxígeno Disuelto

La medición del oxígeno disuelto para esta etapa se realizó en intervalos de 1 minuto, y se extendió el tiempo de tratamiento a 1 hora, para todos los flujos, y en dos condiciones de pendiente de canal (P=0% y P=3%), tomando en cuenta únicamente la agitación superficial (*). Se graficaron a la par los resultados de la Etapa 1 (E1- P=0% y E1 -P=3%), a media hora de tratamiento, con el propósito de observar el consumo de OD por parte de las bacterias.

Para el caso de Q=0.13 L/s (Figura 43) se observó que el incremento de OD en el agua residual tiene un comportamiento exponencial a una hora de tratamiento, sin presentar diferencia entre las dos pendientes de canal, obteniéndose concentraciones finales de OD por encima de 5 mg/L (76% de SAT). Las líneas obtenidas tienen una pendiente prácticamente similar con las líneas de las pruebas con agua potable (E1- P=0% y E1 -P=3%).

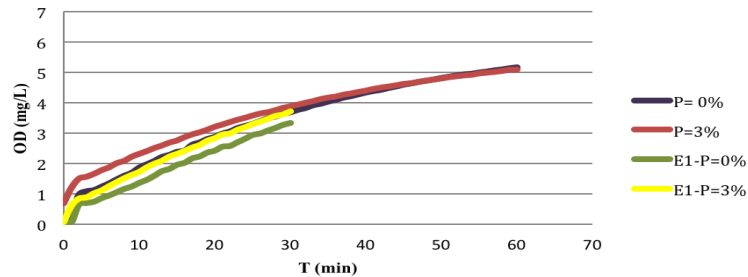


Figura 43. OD vs Tiempo para $Q = 0.13 \text{ L/s}^*$.

Para el flujo $Q=0.22 \text{ L/s}$ (Figura 44) se observó que el incremento de OD en el agua residual tiene un comportamiento exponencial, a una hora de tratamiento, obteniéndose concentraciones finales mayores a 5 mg/L y 6 mg/L , para $P=0\%$ y $P=3\%$ respectivamente, diferencia que se debió a la concentración de OD inicial para cada condición de pendiente de canal; sin embargo, el comportamiento para ambas pruebas es el mismo, no obstante que la saturación de OD final haya sido de 83% y 87% (Figura 45) para $P=0\%$ y $P=3\%$, respectivamente. Además, para ambos casos, se observó que al minuto 50 la tendencia es asíntota, situación que debía haberse presentado, al menos para $P=0\%$, cerca de la concentración de 6.64 mg/L , a 21°C , lo que no ocurrió por la presencia de sólidos.

Es posible observar también que la pendiente de las pruebas con agua potable ($E1-P=0\%$ y $E1-P=3\%$) son mayores con respecto a las pruebas con agua residual ($P=0\%$ y $P=3\%$) por la presencia de sólidos.

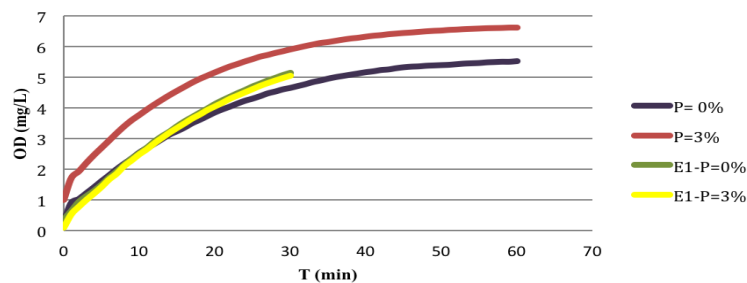


Figura 44. OD vs Tiempo para $Q = 0.22 \text{ L/s}^*$.

Y en la Figura 45 se muestran los resultados para las corridas de $Q = 0.4 \text{ L/s}$, donde se observó que el incremento de OD en el agua residual tiene un comportamiento exponencial, obteniéndose concentraciones finales muy cercanas a los 6 mg/L (86% de saturación de OD en promedio), a una hora de tratamiento, para ambas condiciones de pendiente de canal. Además, se observó que al minuto 40 la tendencia es asíntota para ambos casos, situación que debía haberse presentado cerca de 6.64 mg/L (21°C).

Las pendientes obtenidas de las líneas para agua potable y residual son diferentes, encontrándose mayor pendiente para las pruebas con agua potable, lo que puede deberse a la presencia de sólidos en el agua residual.

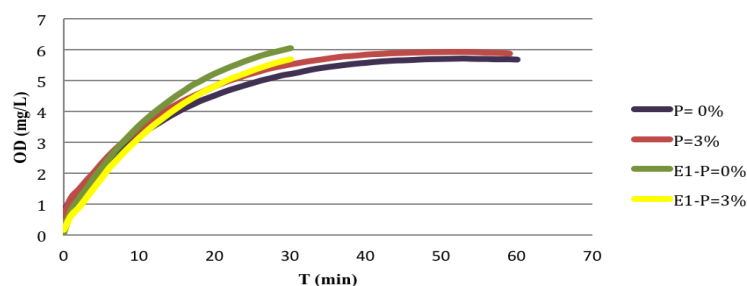


Figura 45. OD vs Tiempo para $Q = 0.44 \text{ L/s}$ *.

Y en la Figura 46 se muestra el porcentaje de saturación de OD al término de cada corrida, mostrándose un mayor valor de saturación para $Q = 0.4 \text{ L/s}$ ($E2 - 3,0^*$ y $E2 - 3,3^*$), con valores desde 80 a 88 % SAT, y para el caso particular de las corridas de $Q = 0.22 \text{ L/s}$ y $P = 3\%$ ($E2 - 2,3^*$) se logró de 81 a 88% SAT, debido a que el OD inicial fue en promedio de 1 mg/L .

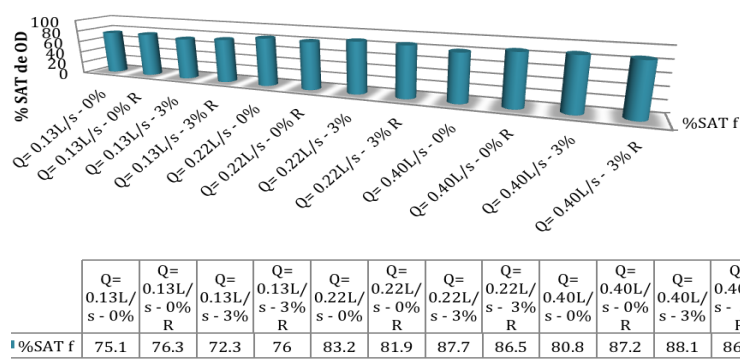


Figura 46. % SAT OD Final.

5.3.3 Temperatura

La temperatura medida en cada corrida fue en promedio de 19°C y 23°C (Figura 47), para el inicio y final de las pruebas, respectivamente, debido al calentamiento de la bomba sumergible, lo cual influye en la asimilación de OD; sin embargo esto no fue un problema para las corridas realizadas.

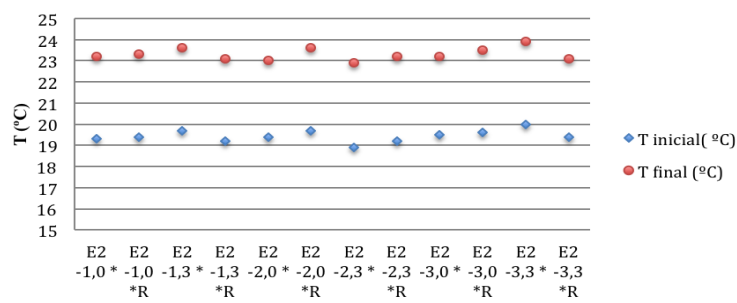


Figura 47. Temperatura.

5.3.1.

5.3.4 pH

El pH fue un parámetro importante para cada corrida, obteniéndose valores de entre 6 y 8 (Figura 48), lo que permitió la supervivencia del consorcio microbiano para que pudieran llevar a cabo sus funciones metabólicas; sin embargo no será la única condición que lo permita, ya que simultáneamente se requiere OD y nutrientes para ello, y por lo tanto se logre la degradación de materia orgánica contaminante.

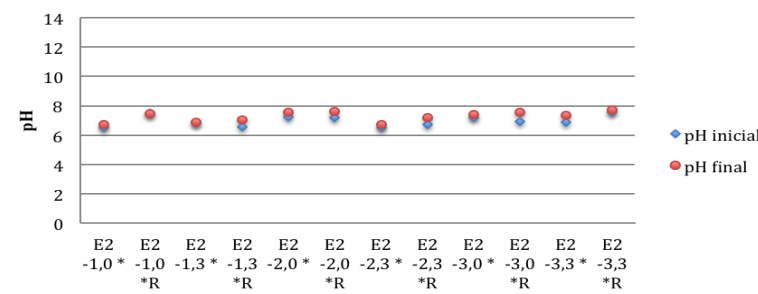


Figura 48. pH.

5.3.5 Conductividad

La conductividad medida en esta etapa se presentó en el intervalo de 0.5 a 0.6 (ms/cm), valores que no representan problema para la solubilidad el OD en el medio, y es posible observar que los valores finales de conductividad con respecto a los iniciales (Figura 49) son superiores en promedio de 0.01 ms/cm, y es debido a un incremento en la temperatura de 4°C y/o por la reacción del sulfito de sodio remanente. Los valores de la conductividad que se presentan indican baja salinidad en el agua, inclusive son inferiores a la etapa donde se empleó agua potable, lo que indica que sigue siendo un factor que no afecta la actividad microbiana.

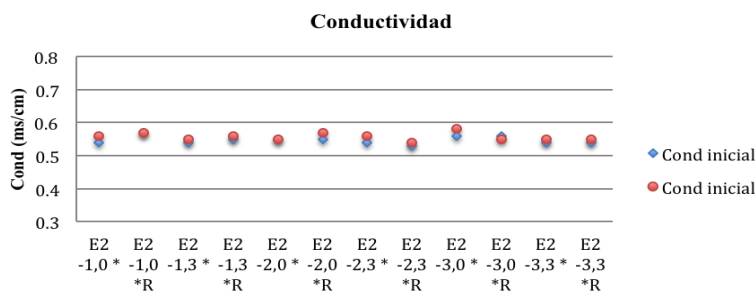


Figura 49. Conductividad.

5.3.6 DQO

La medición de la demanda química de oxígeno (DQO) fue básica para la determinación de la capacidad de degradación de contaminantes por parte de los microorganismos dentro del sistema de aireación propuesto, a las condiciones de trabajo establecidas. Para ello fue necesario tomar una muestra al inicio de la corrida y al final de ella, y se midieron la DQO total (DQOt) y DQO soluble (DQOs) al inicio de la corrida, y al término de la prueba se midió únicamente la DQOs, ya que se observó un rompimiento del fóculo durante agitación superficial de la propela, lo cual no permitió medir la DQO total (Figura 50).

La concentraciones obtenidas fueron en promedio de 20 mg/L para DQOt inicial, de 15 mg/L para la DQO soluble, y al concluir las pruebas se tuvo en promedio 12 mg/L de DQO soluble, para todas la condiciones de caudal y pendientes de canal.

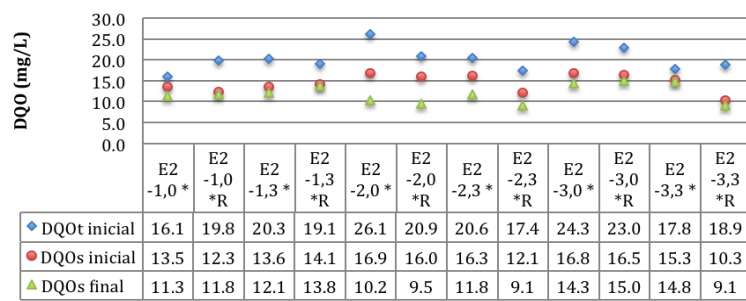


Figura 50. DQO.

Los porcentajes de remoción de DQOs fueron en promedio de 10% para $Q=0.4$ L/s (E2 – 3,0* y E2 – 3,3*), de 33% para $Q=0.22$ L/s (E2 – 2,0* y E2 – 2,3*), y de 9% para $Q=0.13$ L/s (E2 – 1,0* y E2 – 1,3*), lo que indica una mayor remoción de DQO para el caudal $Q=0.22$ L/s, tal como se muestra en la Figura 51.

Los bajos porcentajes de DQO pueden atribuirse al corto tiempo de tratamiento o al daño que sufrió el consorcio bacteriano; sin embargo esto no deja de lado el hecho de que se fue posible el consumo de contaminantes por parte de los microorganismos.

Para el caudal $Q=0.4$ L/s y $Q=0.22$ L/s pudo haber influido la agitación superficial provocada por la propela, la cual generó un daño en la estructura del flóculo, ya que se observó al final de cada corrida que éste se encontraba disperso, por lo cual no sedimentó. Y para el caudal $Q=0.13$ L/s se presentó una sedimentación parcial en el tanque de aireación, lo que pudo influir en la degradación, al no encontrarse completamente mezclado con el agua residual.

También es importante contar con un consorcio bacteriano adaptado a las condiciones de un sistema en particular, y probablemente en ésta, la degradación de contaminantes se vio limitada, tanto por el tiempo de tratamiento, por el esquema de agitación y la sedimentación parcial que se observaron.

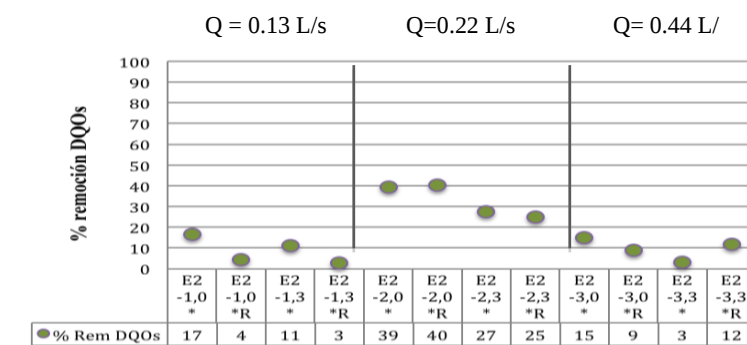


Figura 51. Porcentaje de Remoción de DQOs.

5.3.7 Sólidos

La determinación de los sólidos es necesaria para conocer la naturaleza de los contaminantes presentes en el agua residual, para lo cual se considera la clasificación de la Tabla 28, donde se muestran los diferentes tipos de sólidos: totales, suspendidos, disueltos, orgánicos (volátiles) e inorgánicos (Fijos).

Tabla 28. Sólidos.

ST = SST + SDT
SST = SSV + SSF
SDT = SDV + SDF
Dónde:
ST = Sólidos Totales
SST = Sólidos Suspendidos Totales
SDT = Sólidos Disueltos Totales
SSV= Sólidos Suspendidos Volátiles
SSF= Sólidos Suspendidos Fijos
SDV= Sólidos Disueltos Volátiles
SDF= Sólidos Disueltos Fijos

La caracterización de sólidos realizada en el presente trabajo, se presenta de acuerdo a la Tabla 28, y en primer lugar se graficaron las concentraciones de Sólidos Totales (ST), en seguida los Sólidos Suspendidos Totales (SST), y ya para concluir los Sólidos Disueltos Totales (SDT). De manera general, las concentraciones de sólidos en el agua no se considera un parámetro

controlable, por el hecho de que se pueden descargar aguas residuales que cambian con respecto a los usos del agua; sin embargo pueden presentarse concentraciones de sólidos muy similares para un agua residual en particular (doméstica o industrial).

Sólidos Totales

Los Sólidos Totales en el agua son la suma de todos los compuestos presentes, sean cual sea su naturaleza. Las concentraciones de dichos sólidos se muestran en la Figura 52, obteniéndose en promedio 156 mg/L para todas las corridas, de los cuales el 46% (72 mg/L) representan los Sólidos Totales Volátiles (STV), que indican la presencia de microorganismos y materia orgánica. Por otro lado el 54% (86 mg/L) representa los Sólidos Totales Fijos (STF), lo que indica la presencia de sales disueltas y arcillas. Se observa también que los sólidos fijos se encuentran en mayor cantidad respecto a los sólidos volátiles, sin embargo no existe gran diferencia.

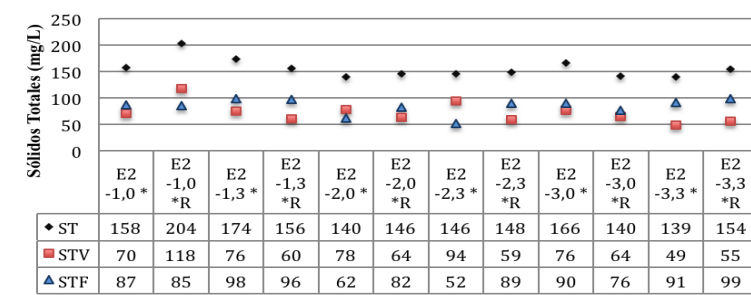


Figura 52. Sólidos Totales.

Sólidos Suspendidos Totales (SST)

Los SST son aquellos sólidos que se retienen en un filtro (microfibra), y pueden ser orgánicos (volátiles) y/o inorgánicos (fijos). La concentración de Sólidos Suspendidos (Figura 53) en promedio fue de 73 mg/L, de los cuales el 65% (46 mg/L) representan los sólidos suspendidos volátiles (SSV), que indican generalmente la presencia de microorganismos. Por otro lado el

35% (27 mg/L) representan los sólidos suspendidos fijos (SSF), que indican la presencia de arena y arcillas.

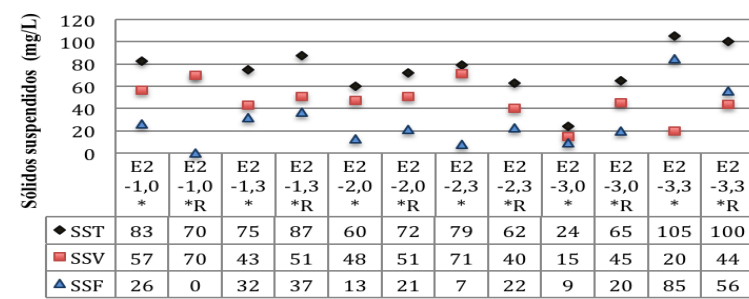


Figura 53. Sólidos Suspendidos.

Sólidos Disueltos Totales (SDT)

Los SDT son aquellos sólidos capaces de ser filtrados, y pueden ser orgánicos (volátiles) y/o inorgánicos (Fijos). La concentración de sólidos disueltos (Figura 54) en promedio fue de 80 mg/L, de los cuales el 33% (26 mg/L) representan los sólidos disueltos volátiles (SDV), que indican la presencia de la materia orgánica fácilmente asimilable por los microorganismos. Por otro lado el 67% (54 mg/L) representan los sólidos disueltos fijos (SDF), que indican la presencia de sales disueltas, tales como el sulfato de sodio que fue producto de la adición de sulfito para remover el oxígeno.

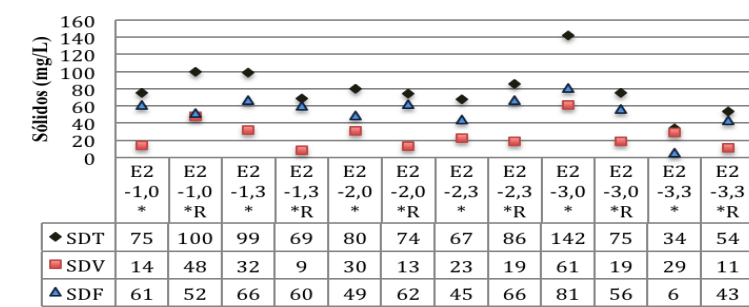


Figura 54. Sólidos Disueltos.

De manera general se observó que la concentración de materia orgánica asimilable (SDV) para las bacterias estuvo en el intervalo de 9 a 61 mg/L, en promedio de 26 mg/L de SDV para $Q=0.13$ L/s, de 21 mg/L de SDV para $Q=0.22$ L/s, y de 30 mg/L de SDV para $Q=0.4$ L/s.

5.3.8 Coeficientes de Transferencia de Oxígeno (K_La), para Etapa 2

De acuerdo a los resultados de OD vs Tiempo para las diferentes pruebas realizadas con agua residual a 1 hora de tratamiento, se observó que de manera general en los tres caudales empleados, se presenta un comportamiento de primer orden. Con el fin de tener elementos de comparación con los resultados de la etapa (agua potable), se realizó la evaluación del coeficiente también a media hora, lo que dio como resultado que se continuó el comportamiento de primer orden, excepto para el flujo 0.13 L/s (flujo mínimo), donde se tuvo un comportamiento de orden cero.

Para las condiciones de presión y temperatura (21°C) que prevalecieron sobre la Etapa 2, debería de presentarse una concentración de OD a saturación de 7.13 mg/L; sin embargo la presencia de sólidos totales en la corriente limitó la asimilación de oxígeno en el agua hasta 6 mg/L (Figura 45).

Para las corridas de $Q=0.13$ L/s se obtuvieron valores en el rango de 0.086 a 0.096 mg/Lmin, a media hora de tratamiento, y de 0.060 a 0.071 1/min, a una hora de tratamiento. Para los flujos $Q=0.22$ L/s y $Q=0.40$ L/s, se obtuvieron valores en el rango de 0.047 1/min a 0.082 1/min a media hora de tratamiento, y del rango de 0.043 1/min a 0.066 1/min a una hora de tratamiento, a 20°C, (Tabla 29). De manera general, se observó que a una hora de tratamiento existió un decremento en el valor de la velocidad, lo cual puede deberse a que los valores finales de la pruebas se acercan en la concentración de OD al 100 % de saturación. Para el caso particular de $Q=0.22$ L/s y $P=3\%$, no se observó una disminución en la velocidad debido a que se inició con un OD de 1mg/L, y al realizar el cálculo del coeficiente, se vió afectado el valor final.

Tabla 29. Coeficientes de Transferencia de Oxígeno para Etapa 2.

K_{La} (mg/Lmin)				
Q = 0.13 L/s				
Temperatura	A 21°C	A 20°C	A 20°C	A 20°C
tiempo	(1h) (min ⁻¹)	(1/2 h)	(1h) (min ⁻¹)	(1/2 h)
P=1%	0.072	0.096	0.071	0.096
tiempo	(1h) (min ⁻¹)	(1/2 h)	(1h) (min ⁻¹)	(1/2 h)
P=3%	0.062	0.086	0.060	0.086
K_{La} (min ⁻¹)				
Q= 0.22 L/s				
Temperatura	A 21°C	A 20°C	A 20°C	A 20°C
tiempo	(1h)	(1/2 h)	(1h)	(1/2 h)
P=1%	0.044	0.047	0.043	0.046
tiempo	E2 -2,3 *			
	(1h)	(1/2 h)	(1h)	(1/2 h)
P=3%	0.067	0.048	0.066	0.047
K_{La} (min ⁻¹)				
Q= 0.4 L/s				
Temperatura	A 21°C	A 20°C	A 20°C	A 20°C
tiempo	(1h)	(1/2 h)	(1h)	(1/2 h)
P=1%	0.046	0.064	0.045	0.062
tiempo	(1h)	(1/2 h)	(1h)	(1/2 h)
P=3%	0.066	0.082	0.064	0.080

Los valores de las velocidades se representan en la Figura 55, donde se observa el comportamiento general para cada corrida establecida en esta etapa.

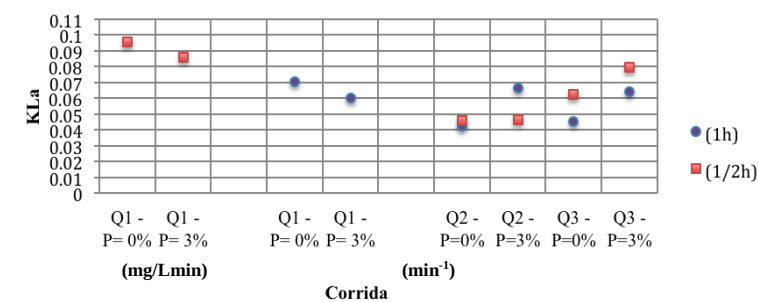


Figura 55. Velocidades de Transferencia de Oxígeno en Agua Residual, a 20°C.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- La colocación de un molino en un canal abierto de bajo flujo permitió la entrada de oxígeno disuelto al agua desde 3.4 mg/L a 6.3 mg/L de OD, rango donde se mantenían los resultados de todas las pruebas, con lo que se logró una remoción de DQOs de 17% en promedio para todas las corridas.
- Se construyó un canal abierto que permitió realizar las corridas propuestas para medir la capacidad de aireación por parte de un sistema mecánico (molino tipo vertical y eje horizontal), y así evaluar el incremento en la autodepuración del agua.
- La asimilación de OD en el agua se vio favorecida a través de la turbulencia superficial por parte del movimiento de la propela, a las condiciones de trabajo establecidas, lo que no ocurrió con el uso del acoplamiento mecánico sugerido (Eje-diafragma), con el cual no se presentó asimilación de OD de la manera deseada.
- La proliferación de burbujas con el uso de acoplamiento mecánico y sin éste no fue comparable, debido a que las burbujas (grandes) generadas con el acoplamiento no se distribuían uniforme en toda el área de paso del tanque de aireación, en cambio las burbujas (finas) generadas con la agitación superficial sí lo hacían, y además éstas permanecían más tiempo en el agua.
- De manera general se observó que la mayor remoción de DQOs se obtuvo en las corridas de $Q=0.22$ L/s (mayor a 20 %), seguida de los flujos $Q=0.4$ L/s y $Q=0.13$ L/s (menor al 20%).
- La velocidad del agua que se alcanzó por el uso del vertedor triangular fue en el rango de 0.316 m/s a 0.331 m/s, con lo que se generó de 130 a 170 RPM, para todas las corridas. A mayor caudal se observó mayor velocidad y RPM por parte de la propela, lo cual favoreció una mayor entrada de OD al agua.
- Se presentó una pérdida de energía por parte del sistema mecánico al realizar pruebas utilizando el acoplamiento mecánico, siendo de 100% (RPM's) cuando se estableció un flujo de $Q=0.13$ L/s, donde la energía hidráulica no fue suficiente para mover la

propela; y de 13% (RPM's) de pérdida de energía en promedio para los caudales de $Q=0.22$ L/s y 0.4 L/s. Por lo tanto, para este caso se recomienda establecer un sistema de transmisiones adecuado para evitar la pérdida de energía.

- Este sistema puede considerarse una alternativa para ayudar a recuperar, en cierta medida, los cauces de bajo caudal dañados por exceso de materia orgánica, ya que no se requiere energía eléctrica, por tanto es accesible económicamente.
- Finalmente se recomienda para futuros estudios, considerar el aprovechamiento de la energía solar para mover el sistema mecánico, empleando ésta energía de manera individual o en conjunto con la energía hidráulica.
- También se sugiere un estudio para conocer el efecto que podría tener la colocación de rocas sobre un canal, así como el acomodo de ellas, que permita generar la turbulencia necesaria para la transferencia de OD al medio, además de observar cómo se presenta la adhesión de la materia sobre la superficie de las rocas para la degradación de materia orgánica.

7. REFERENCIAS

- Agenda del agua 2030. *Avances y Logros 2012*, SEMARNAT.
- Atlas del Agua en México 2013. Gobierno de la República, SEMARNAT, CONAGUA.
- APHA. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (1998). 20th edition, American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation, Washington, DC, USA.
- ASCE. *A Standard For The Measurement Of Oxygen Transfer In Clean Water*, New York, Julio de 1984.
- Brock, T. D. 1978. *Biología de los microorganismos*, 2ª edición. Ediciones Omega, Barcelona, 774 pp.
- Bruce E. Rittmann & Perry L. McCarty. *Biotecnología del Medio Ambiente, Principios y Aplicaciones*. McGraw Hill. España. 2001.
- Carlos M. Duarte, Sergio Alonso, Gerardo Benito, Jordi Dachs, Carlos Montes, Mercedes Pardo Aida, F. Ríos Rafel Simón y Fernando Valladares. 2006. *Cambio Global, Impacto de la Actividad Humana Sobre la Tierra*. Colección divulgación 03. CSIC, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid.
- Capacitación- IMTA. *Tratamiento anaerobio de aguas residuales, Material Tecnológico*. Coordinación de desarrollo profesional e institucional y Subcoordinación de tecnología educativa. Centro de capacitación, Jiutepec, 25 al 29 de noviembre de 2002.
- Steven Chapra C., 1997, *Surface Water-Quality Modeling*, Mac Graw Hill, EUA.
- CNA 2010 a. *Situación del Subsector Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*, 2010. Edición 2010.
- CNA 2010 b. *Situación del Subsector Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*, 2010. Edición 2011.
- Curso-IMTA. *Manual 3er Curso – Taller Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de lodos activados*. SEMARNAT-IMTA-FUNDACIÓN GONZALO RIO ARROTE, I.A.P. Junio 27-julio, Pátzcuaro, Michoacán.
- Dunia Beatriz Pérez Gudiel, 2007. *Evaluación del efecto de la aireación artificial para mejorar la calidad del agua en el lago de Amatitlán*. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia. Guatemala. Informe de Tesis. Agosto de 2007.
- Eckenfelder, W.W., Jr., and Ford, D. L. *Water Pollution Control*. Pemberton Press. Austin and New York, 1970.
- Felder & Reusseau, 2006. *Principios Elementales de los Procesos Químicos*. 3er edición. Editorial LIMUSA WILEY. México, D.F., 2006.
- Ley Agraria.
- Ley de Agua Nacionales, Última reforma publicada DOF 08-06-2012.
- Manual de análisis de agua. Segunda edición. HACH. Agua potable, Aguas residuales, Agua de mar, Agua de caldera/de enfriamiento, Agua ultrapurificada.
- María Leny Matos & Marina Rodríguez De Estaba, 2002. *Cambios Iniciales En La Desestratificación Del Embalse Pao Cachinche Por Aireación Artificial Edo. Carabobo. Venezuela*. Facultad De Biología, Universidad De Los Andes. HIDROCENTRO. C.A. XXVIII Congreso Interamericano De Ingeniería Sanitaria Y Ambiental Cancún, México, 27 Al 31 De Octubre, 2002.

- Michael J. Moran & Howard N. Shapiro, 2004. *Fundamentos de Termodinámica Técnica*, 2da edición. Editorial REVERTÉ. Barcelona, España, 2004. Cap 2. Pg. 35.
- NMX-AA-034-SCFI-2001. Análisis de agua - *Determinación de Sólidos y Sales Disueltas en Aguas Naturales, Residuales y Residuales Tratadas* - Método de prueba.
- NMX-AA-012-SCFI-2001. Análisis de agua - *Determinación de Oxígeno Disuelto en Aguas Naturales, Residuales y Residuales Tratadas* - Método de prueba.
- NMX-AA-034-SCFI-2001. Análisis de agua - *Determinación de Sólidos y Sales Disueltas en Aguas Naturales, Residuales y Residuales Tratadas* - Método de prueba.
- NMX-AA-093-SCFI-2000. Análisis de agua - *Determinación de la Conductividad Electrolítica* - Método de prueba.
- NMX-AA-008-SCFI-2011. Análisis de agua - *Determinación del pH* - Método de prueba.
- NMX-AA-003-1980. Aguas residuales. Muestreo.
- Jerry R. Taricska, J. Paul Chen, Yung –Tse Hung, Lawrence K. Wang and Shiai-Wen Zou. *Surface and Spray Aeration*. Handbook of Environmental Engineering, Vol 3: Biological Treatment Processes. Springer, in 1986. Edited by L.K. Wong *et al.* C. The Humana Press, Totowa, NJ. Page 151.
- Oyarzún, G.J., 2004. *Modelación y Simulación de Oxígeno Disuelto, Materia Orgánica y Relación Distribucional de Macroinvertebrados en la Subcuenca del Río Traiguén*. Temuco: Universidad Católica de Temuco.
- Packard, T. T. 1969. *The Estimation of the Oxygen Utilization Rate in Seawater from the Activity of the Respiratory Electron System in Plankton*, Ph.D. Thesis, University of Washington, Seattle.
- Plan Hídrico Nacional 2007-2012. SEMARNAT.
- Programa Hídrico Visión 2030 del Estado de Michoacán de Ocampo. Comisión Nacional del Agua, Serie: *Planeación Hidráulica en México, Componente: Planeación Regional y Estatal*. Julio de 2009.
- Pedro Fernández Díez. *Turbinas Hidráulicas*. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética. Universidad De Cantabria. [En línea]: <<http://www.termica.webhop.info/>> [Consulta 4 de febrero de 2013].
- Raymundo Erazo E., Jorge L. Cárdenas R., 2001. *Determinación Experimental del Coeficiente de Transferencia de Oxígeno ($K_L a$) en un Bioreactor Batch*, Departamento Académico de procesos, Facultad de Química. Lima Perú., Vol 4 °N 2. Páginas 22-27.
- Reinaldo Gélvez Gutiérrez, Luis A. Camachoo Bláotitlerso y Erasmo Alfredo Rodríguez Sandoval, 2008. *Metodología para Estimar la Tasa de Reaireación con Trazadores Volátiles*”. XVIII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología. Sociedad Colombiana de Ingenieros. Mayo de 2008.
- SEMARNAT, 2011. *Estadísticas del Agua en México*. Edición 2011.
- SENER, 2008. *Tratamiento de Agua para su Utilización en Calderas*. Secretaría de Energía (SENER), Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (CONAE), PyME. Dirección de Enlace y Programas Regionales, Apoyo al Sector Privado, Enero 2008.
- Ramalho, 1983. *Tratamiento de Aguas Residuales*. Faculty of Science and Engineering, Laval University. Quebec, Canadá. Editorial Reverté, S.A. de C.V. Barcelona, Bogotá, Buenos Aires, Caracas, México.
- Tsivoglou, E. C., and Neal, L. A. *Tracer Measurement of Reaeration. III. Predicting the Reaeration Capacity of Inland Streams*. J. Water Pollution Control Fed., 1976.

8. ANEXOS

8.1. Materiales de Construcción y de Laboratorio

Materiales y Herramientas de Construcción del Prototipo

- Una placa de acrílico, 3mm.
- 3 tramos de tubo de aluminio, ½"
- Silicón frío
- Ángulos perforados
- Remaches
- Escuadra
- Flexómetro
- Nivel de burbuja
- Manguera, ¾"
- Válvulas de paso
- Tubo CPVC, ½"
- Tubo PVC 1 ½"
- Conectores CPVC, ½"
- Pegamento para CPVC
- Teflón
- Remachadora
- Taladro
- Pulidora
- Herramienta eléctrica giratoria
- Lima o lija
- Disco para cortar acrílico
- Seguros de ojillo, ¼"
- Cautín.

Equipo de Laboratorio

- Multiparamétrico, CONDUCTRONIC PC18
- Sonda de Oxígeno Disuelto luminiscente, LDO101. Marca HACH, HQd Portable Meter
- Digestor (marca HACH)
- Espectrofotómetro HACH, DR/4000U
- Horno Secador (marca FELISA)
- Bomba de vacío (marca SIEMENS)
- Mufla (marca FELISA)

- Balanza analítica, (marca DENVER INSTRUMENT)
- Cronómetro
- Pocket TACH, Non-Contact, 461700. Medidor de RPM. EXTECH Instruments.

Otros Equipos o Materiales

- Bomba BOYU, modelo s-9901, 60 Hz. 3 L/min, presión 0.012 Mpa.
- Bomba sumergible, modelo 5-MSP, 127 V, 60 Hz 5, 8 A. 0.4 L, Little Giant Water Wizard.
- Tambo de 60 L
- Garrafa de 20 L
- Tubo PVC 1 ½"
- Bitácora
- Embudo
- Garrafa 1L
- Bomba para pecera OTTO AIR PUMP SA-8000, 100-120V, 4.5 W, 50/60 Hz
- Cámara fotográfica, marca Nikon coolpix L310, wide 21x zoom, 230k dots LCD, 14.1 megapíxeles. Continuo A, High velocidad
- Manguera flexible de poro fino
- Piedra porosa para pecera.

Materiales de Laboratorio

- Crisoles Gooch
- Cápsulas de porcelana
- Pinzas para crisol y cápsula
- Filtro de fibra de vidrio de tamaño adecuado al crisol Gooch utilizado una porosidad de 2 µm o menor
- Pipeta
- Agitadores

- Vasos de precipitados
- Matraz Kitazato
- Celdas de 25 ml
- Embudo (matraz kitazato)
- Probeta 100 ml
- Pizeta
- Cono Imhoff
- Desecador
- Botella Winkler 500 mL
- Parafilm
- Manguera transparente ½
- Guantes
- Cubreboca

- Bata de laboratorio.

Reactivos

- Agua desionizada
- Sulfito de sodio (Na_2SO_3), 98%
- Viales químicos para DQO (Rango bajo 3-150 mg/D DQO)
- Viales químicos para sulfato (0 -70 mg/L)
- Soluciones buffer para calibración de electrodo (4 y 7)
- Hipoclorito de sodio.

8.2. Construcción de Prototipo y Funcionamiento del Acoplamiento Mecánico



Figura 56. Etapa de Construcción de Prototipo.



Figura 57. Canal Abierto a Prueba de Fugas.



Figura 58. Instalación del Acoplamiento Mecánico.

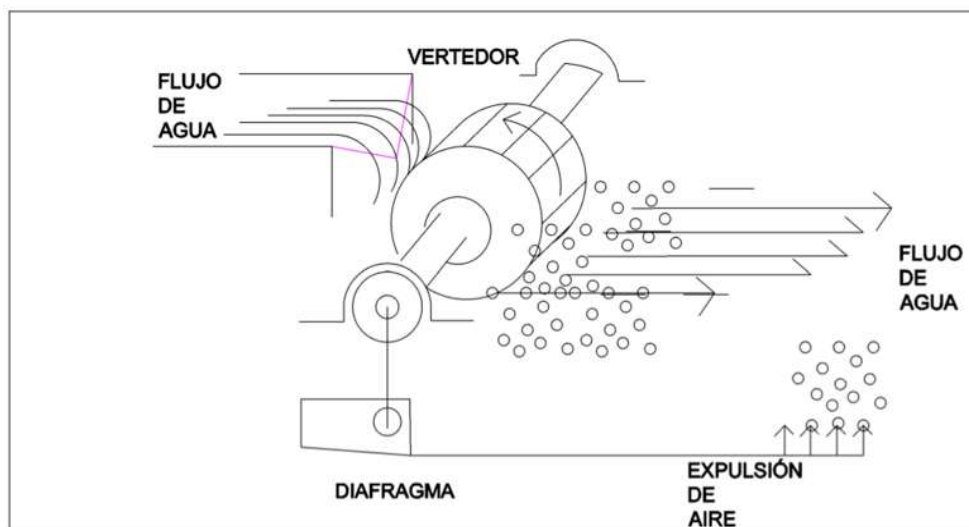


Figura 59. Funcionamiento de Acoplamiento Mecánico, Propela - Eje- Diafragma.