

UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO
FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO INGENIERIA CIVIL



**“Estudio Comparativo de la Variación de la DQO al
Incorporar Compuerta y Caída Hidráulica en un
Canal Abierto que Transporta Agua Residual”**

Proyecto de Título presentado en conformidad a los requisitos para obtener el
Título de Ingeniero Civil

ROSA DEL CARMEN FIGUEROA MELLA

Prof.Guía: PEDRO CISTERNA OSORIO

Concepción, Marzo del 2007

Dedico esta tesis a mi amado ángel

Berta Julia Riffo Martínez.

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto es el resultado de un trabajo conjunto con muchas personas, que me han apoyado incondicionalmente.

Agradezco a mi ángel que hoy me ilumina y me protege desde el cielo, Berta Julia Riffo Martínez, gracias por entregarme todo tu amor y alegría antes de emprender tu viaje.

Agradezco a mi amada familia por su apoyo, valores, alegrías y eterno amor, en especial a mi madre, mujer de inmenso corazón y gran valentía, y a mi padre gracias por tus sabios consejos y la confianza incondicional depositada en mí.

Agradezco a Patricio Contreras, por su apoyo, amistad e infinita paciencia, gracias por ser un gran pilar en este proceso.

Agradezco a mis lindos amigos por su gran colaboración, cariño, y por confiar en mí, en especial a Paola Araya, Lorena Maldonado, Viviana Betanzo, Carlos Huaiquin y Jorge Flores, gracias por hacer de la universidad un lugar más acogedor.

Agradezco a la familia Figueroa-Mella y Arévalo-Mella por todo el apoyo brindado durante mi vida universitaria, gracias por hacerme sentir parte de su familia en momentos en que la distancia me alejaba de los míos.

Agradezco a mis profesores por entregarme sus conocimientos y valiosa experiencia, en especial al Señor Héctor Venegas por sus sabios consejos de vida.

Finalmente, agradezco a Dios por su infinito amor.

ÍNDICE GENERAL

CAPITULO Nº 1: INTRODUCCIÓN	1
<hr/>	
1.1 Justificación	2
1.2 Objetivos del Proyecto e Hipótesis	3
1.2.1 Objetivo General	3
1.2.2 Objetivos Específicos	3
1.2.3 Hipótesis	4
1.3 Metodología	4
CAPITULO Nº 2: FUNDAMENTO TEÓRICO	7
<hr/>	
2.1 AGUAS RESIDUALES	7
2.1.1 Características y composición típica de las aguas residuales	8
2.1.2 Tipos de Contaminantes	9
2.1.3 Medición de la Carga Contaminante	11
2.1.3.1 Demanda Química de Oxígeno	11
2.1.4 Legislación Vigentes Sobre Cuerpos Receptores	12
2.1.4.1 Delimitaciones de Emisiones Según las Distintas Normas.	12
2.2 DEPURACIÓN DE LAS AGUAS	16
2.2.1 Autodepuración	17

2.2.2	Parámetros físicos y químicos del proceso	21
2.2.2.1	Oxígeno Disuelto	21
2.2.2.2	Temperatura	23
2.2.2.3	Turbidez	24
2.2.2.4	Turbulencia	26
2.3	TRANSFERENCIA DE OXÍGENO	27
2.3.1	Proceso de Transporte	30
2.3.1.1	Advección	30
2.3.1.2	Difusión	30
2.3.2	Proceso de Transformación	31
2.3.2.1	Oxidación de la DBO	31
2.3.2.2	Demanda Oxígeno de los Sedimentos	32
2.3.2.3	Fotosíntesis y Respiración	33
2.3.2.4	Demanda de Oxígeno en Canales Abiertos	35
2.3.3	Captación de Oxígeno en Caídas de agua	36
2.4	ELEMENTOS BÁSICOS DEL CANAL ABIERTO	38
2.4.1	Propiedades de Cada Experiencia	39
2.4.1.1	Canal Base	39
2.4.1.2	Canal con Compuerta Hidráulica	40
2.4.1.3	Canal con Caída Hidráulica	41

CAPITULO Nº 3: ETAPA EXPERIMENTAL	42
<hr/>	
3.1 METODOLOGIA	42
3.2 CARACTERISTICA Y DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA	46
3.3 ANTECEDENTES PREVIO A LA EJECUCIÓN	55
3.3.1 Alimentación del Sistema	55
3.3.2 Área y Pendientes Escogidas	57
3.3.3 Características del Acrílico	58
3.3.4 Tipos y Conservación de la Muestra	60
3.4 FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA	62
3.4.1 Descripción de los Procedimientos	63
3.4.2 Perfeccionamiento del Sistema	65
3.4.3 Descripción y Desarrollo de la Toma de muestras para cada experiencia	65
3.4.3.1 Canal Base	66
3.4.3.2 Canal con Compuerta Hidráulica	68
3.4.3.3 Canal con Caída Hidráulica	69
3.4.3.4 Análisis de Pendiente	70
3.4.3.5 Detalles de la variación de DQO en la Caída Hidráulica	71
3.4.3.6 Análisis Compuestos	72
3.4.3.7 Análisis en Terreno	73

CAPITULO Nº 4: ANALISIS Y RESULTADOS	77
4.1 SITUACION EN EL TANQUE DE MEZCLA	77
4.2 SISTEMA DE CANAL CON PENDIENTE DE UN 3%	78
4.3 SISTEMA DE CANAL CON PENDIENTE DE UN 1%	82
4.4 INFLUENCIA EN LA DQO AL INCORPORAR UN TRAMO DE CANAL AL INICIO DE CADA SISTEMA	86
4.5 ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DE DQO AL MODIFICAR LA ALTURA DE LA CAÍDA HIDRÁULICA.	88
4.6 DETALLES DE LA VARIACIÓN DE LA DQO EN LA CAÍDA HIDRÁULICA	91
4.7 ANÁLISIS MUESTRAS COMPUESTAS	93
4.8 ANÁLISIS OXÍGENO DISUELTO	95
4.9 RESULTADOS EN TERRENO	98

CAPITULO Nº 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES **115**

5.1 CONCLUSIONES 115

5.2 RECOMENDACIONES 117

BIBLIOGRAFÍA **118**

ANEXOS **121**

Anexo 1: “Normas de Emisión” 121

Anexo 2: “Cálculos Generales ” 129

Anexo 3: “Resultados de DQO” 133



CAPITULO 1

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, diversos son los factores que desencadenan cambios al medio ambiente, en especial al medio acuático, originado en gran parte por las aguas residuales vertidas al sistema, variando las características propias del cauce y en algunos casos superando la capacidad de autodepuración del sistema debido a las propiedades y/o concentraciones que presentan dichos vertidos.

El presente estudio consiste en analizar las variaciones o disminuciones de demanda química de oxígeno (DQO), que provocaría la oxigenación en aguas residuales previamente tratadas cuando dichas aguas son transportadas en un sistema de canal abierto, llamado en este estudio Canal Base, al cual se le incorporan nuevos elementos con el fin de originar nuevos escenarios llamados: Canal con presencia de Compuerta hidráulica y un Canal con presencia de Caída hidráulica. A dichas aguas residuales se les evaluarán los niveles de materia orgánica que presentan en el origen y al término del canal analizado, logrando con este estudio lo que puede ser un instrumento de investigación de la contaminación provocada por las aguas residuales y de esta forma favorecer la autodepuración de los cauces naturales y preservar el medio ambiente.



1.1 JUSTIFICACION DEL TEMA

La necesidad de minimizar los índices de contaminación en las aguas residuales, tanto domésticas como industriales, ha llevado a crear diferentes métodos de tratamientos de aguas residuales tanto biológicos, físicos como fisicoquímicos. Sin embargo al salir de éstos, las aguas residuales ya tratadas, aún poseen niveles residuales de DQO, que podrían ser disminuidos al transportarlas a través de canales abiertos con diferentes características hidráulicas, tales como una compuerta y una caída hidráulica, logrando la oxigenación y la oxidación de la materia orgánica presente en dichas aguas antes de llegar a su curso receptor.

Por todo lo anterior, y debido a que esta alternativa puede llegar a ser una solución complementaria en la disminución de la DQO, se cree necesario el desarrollo de este estudio.



1.2 OBJETIVOS E HIPOTESIS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar la reducción de la DQO del agua residual, a partir de la incorporación natural de oxígeno, por medio del transporte del flujo de aguas residuales en canales abiertos, permitiendo la oxidación de la materia orgánica presente.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Comparar la variación de la DQO frente a la sensibilización del flujo de agua residual por escenario, consistente en tres canales abiertos; con pendiente de fondo continua, con presencia de compuerta y con caída hidráulica.

- Evaluar la variación de la DQO del flujo de agua residual debido al cambio en el valor de la pendiente.

- Evaluar la variación de DQO al incorporarle a cada canal estudiado un tramo sin pendiente con el fin de homogeneizar el flujo de agua residual.

- Estudiar la variación de la DQO en canales reales al variar la carga inicial de materia orgánica y las propiedades hidráulicas.



1.2.3 HIPÓTESIS

Un canal abierto que posea una compuerta o una caída hidráulica podrán ayudar a oxidar la materia orgánica de las aguas gracias a la incorporación natural de oxígeno, disminuyendo los niveles de DQO de las aguas residuales.

1.3 METODOLOGÍA

La metodología de trabajo para este proyecto está constituida en tres etapas:

Fundamentos Teóricos: En esta etapa se estudian y analizan los conceptos asociados a las características de las aguas residuales, sus contaminantes más comunes, los métodos usados para medir estos contaminantes, con un fuerte énfasis en el fenómeno de autodepuración, los parámetros que interfieren en el y la importancia del oxígeno presente en este proceso. Para conseguir lo anterior se investigará bibliografía nacional disponible, se coordinarán reuniones con empresas importantes del rubro sanitario, además de buscar intensamente información relacionada en la World Wide Web mediante buscadores generales y especializados.



Etapa Experimental: En esta etapa se realizarán todas las muestras necesarias, con el fin de cumplir el objetivo del estudio. Las muestras antes mencionadas se tomarán al final del tramo de cada canal (canal base, canal con compuerta, canal con caída hidráulica y canales en terreno) y en puntos específicos dependiendo del objetivo. El agua residual deberá circular por el sistema para luego analizar y comparar los resultados de los análisis de demanda química de oxígeno y de oxígeno disuelto dependiendo del caso, se verifica si existió variación en el valor de dicha variable del agua residual al transportarse por los diferentes sistemas de canales (Ver Figura 11).

Para lograr lo anterior se construirá un canal en laboratorio, simulando los fenómenos de estudio, de esta forma se podrán realizar análisis y mediciones de DQO y de oxígeno disuelto (OD) en dicho canal. Se finalizará con la realización de mediciones en terreno, logrando con esto verificar si existe una relación entre los resultados de laboratorio y los de terreno.

Resultados, Conclusiones y Recomendaciones: En esta etapa final, se expresan los resultados obtenidos del análisis de las etapas anteriores, y se generan las conclusiones y recomendaciones necesarias, determinado así la factibilidad del estudio en la reducción de la DQO. Esto se conseguirá con los resultados de las muestras obtenidas del canal de laboratorio y los canales en



terreno. Además de reuniones con personas especializadas en donde se comentarán dichos resultados.

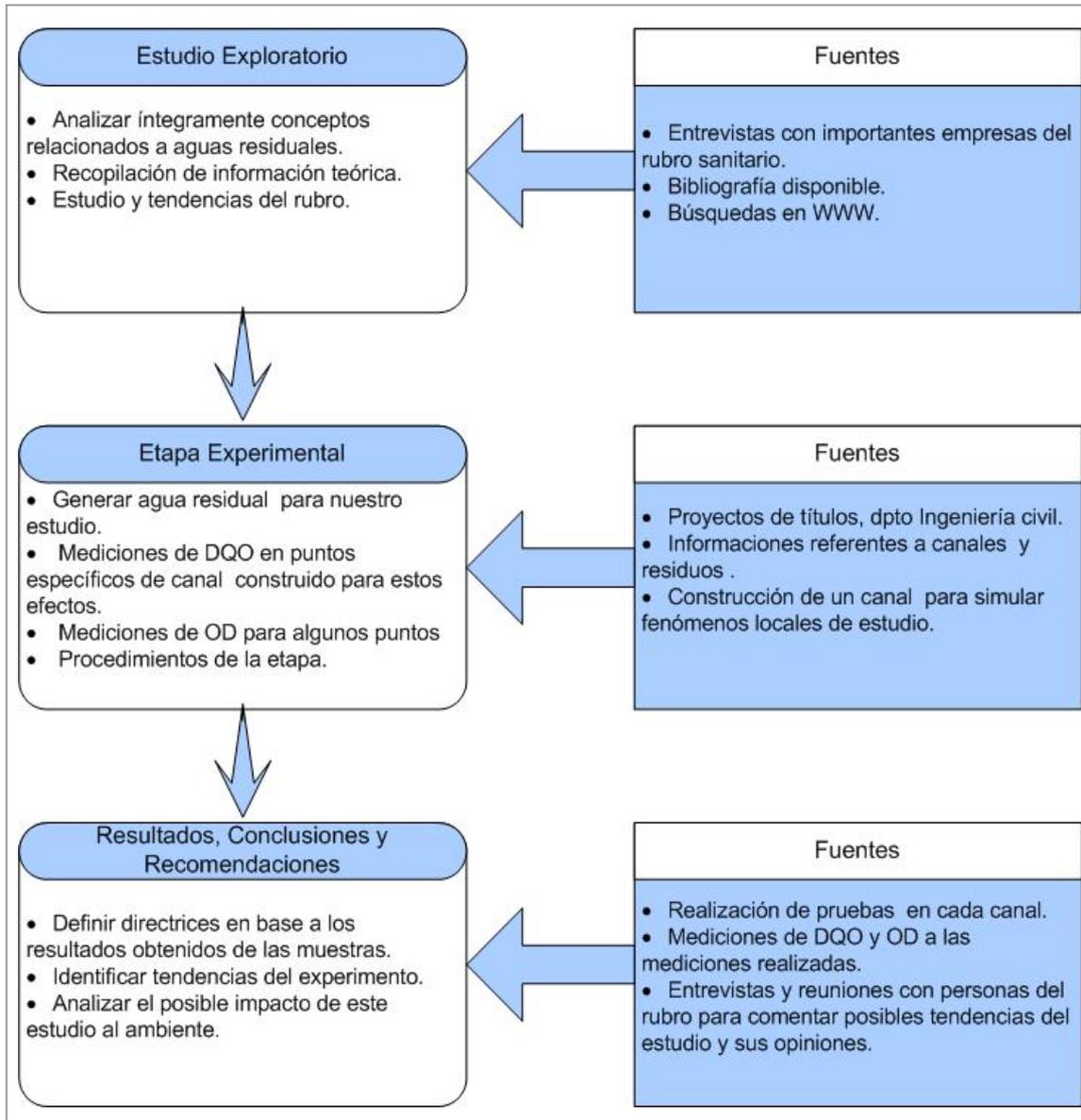


Figura 1- Esquema Metodología.



CAPITULO 2

2. FUNDAMENTO TEÓRICO

En el siguiente capítulo se estudian y describen los conceptos más relevantes asociados a aguas residuales, autodepuración y transferencia de oxígeno, los cuales otorgarán las herramientas necesarias para el desarrollo y comprensión del presente estudio.

2.1 AGUAS RESIDUALES

Son aguas residuales aquellas que ya han sido usadas y por ende constituyen un residuo, es decir no sirven para su uso directo. Las aguas residuales suelen llamarse; domésticas, industriales, infiltración y lluvias. Las aguas residuales domésticas constituyen la fracción más importante de las aguas residuales urbanas y básicamente son el resultado de actividades cotidianas de las personas tales como limpieza de casa, baño, lavado de ropa, etc.

Este estudio está encauzado a ser una alternativa complementaria de descontaminación para las aguas urbanas tratadas y/o con índices residuales de DQO y las aguas lluvias no tratadas, vertidas directamente a un cauce natural.



2.1.1 CARACTERÍSTICAS Y COMPOSICIÓN TÍPICA DE LAS AGUAS RESIDUALES

En General las aguas urbanas brutas tienen una magnitud y características bastante uniformes una vez definido el nivel económico y social de la población (Cisternas, 2004). Influenciado a la vez por factores externos como la presencia de industrias, entre otros.

Las aguas de lluvia, esencialmente, se caracterizan por arrastrar muy rápido la contaminación, alcanzando altos niveles de polución especialmente en zonas industriales, por tanto pueden provocar importantes problemas en la contaminación de un río al ser vertidas sin ningún tratamiento previo.

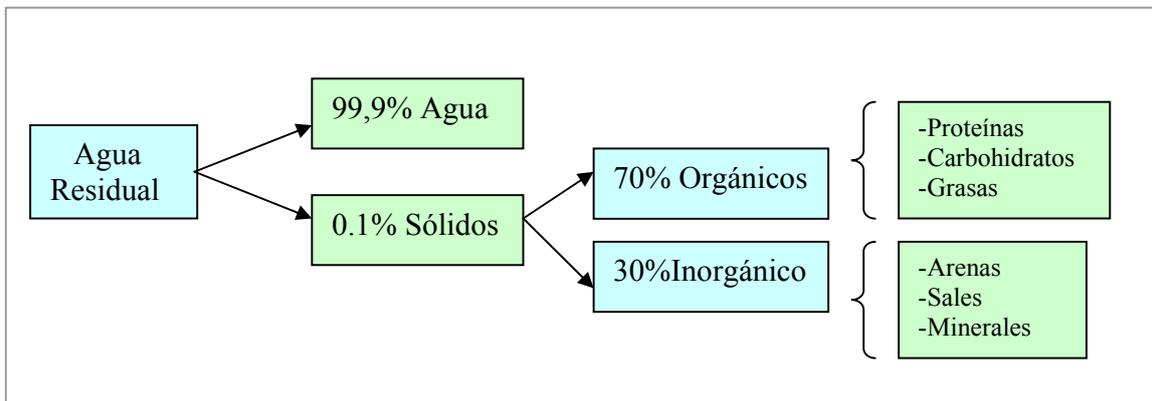


Figura 2: Composición de las aguas residuales.



2.1.2 TIPOS DE CONTAMINANTES

Son diversos los contaminantes encontrados en las aguas residuales, siendo los más importantes:

■ **Materia Orgánica:** constituida esencialmente por compuestos cuya estructura química está conformada básicamente por carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno. Corresponde, aproximadamente, a un 60% de los contaminantes de las aguas residuales urbanas y aparecen como:

a) **Proteínas:** proceden fundamentalmente de excretas humanas o de desechos de productos alimentarios. Son biodegradables, bastante inestables y responsables de malos olores.

b) **Carbohidratos:** se incluyen en este grupo azúcares, almidones y fibras celulósicas. Proceden, al igual que las proteínas, de excretas y desperdicios.

c) **Aceites y Grasas:** son altamente estables, inmiscibles con el agua, proceden de desperdicios alimentarios en su mayoría, a excepción de los aceites minerales que proceden de otras actividades.

d) **Nutrientes:** tales como los nitratos y fosfatos, que pueden alterar la hemoglobina e impedir el transporte de oxígeno a los tejidos en el ser humano, a demás provocan el crecimiento desmesurado de plantas acuáticas (eutrofización).



■ **Contaminantes inorgánicos:** son de origen mineral y de naturaleza variada: sales, óxidos, ácidos y bases inorgánicos, metales, etc. Son más abundantes en los vertidos generados por la industria.

Los componentes inorgánicos de las aguas residuales estarán en función del material contaminante así como de la propia naturaleza de la fuente contaminante.

■ **Los sólidos en suspensión y sedimentos:** ya sean orgánicos o inorgánicos, producen turbidez y dificultan la actividad fotosintética de las plantas acuáticas y la vida de los peces.

■ **Organismos patógenos:** Son quienes provocan numerosas enfermedades que afectan la salud del hombre, encontramos organismos tales como bacterias, virus y protozoos.



2.1.3 MEDICIÓN DE LA CARGA CONTAMINANTE

Las mediciones más comunes incluyen la determinación del contenido de sólidos, la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), la demanda química de oxígeno (DQO), el oxígeno disuelto (OD) y el pH, que mide la acidez del agua residual.

En el presente estudio se utilizará como principal índice de contaminación de las aguas residuales la demanda química de oxígeno (DQO) para medir la carga contaminante.

2.1.3.1 DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO: DQO

La demanda química de oxígeno (DQO) es una medida del oxígeno requerido para oxidar todos los compuestos presentes en el agua, tanto orgánicos como inorgánicos, por la acción de agentes fuertemente oxidantes en medio ácido y se expresa en miligramos de oxígeno por litro (mg O₂/L). La materia orgánica se oxida a dióxido de carbono y agua.

La DQO permite hacer estimaciones de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), que a su vez es una medida de la cantidad de oxígeno consumido en el proceso biológico de biodegradación de la materia orgánica en el agua; el término degradable puede interpretarse como expresión de la materia orgánica que puede servir de alimento a las bacterias; a mayor DBO, mayor grado de contaminación.



2.1.4 LEGISLACIÓN VIGENTES SOBRE CUERPOS RECEPTORES

Debido al rápido crecimiento de la contaminación de las aguas y la expansión inminentes de las grandes industrias, generadoras de importantes volúmenes de aguas residuales, es que se han creado distintas Decretos y Normas que legislan la evacuación de estas aguas a los cuerpos receptores, con el fin de proteger y preservar nuestras aguas naturales.

Está vigente desde el 03.09.01 la Norma que regula todo tipo de descargas a aguas marinas y continentales superficiales; Norma de emisión para la regulación de contaminantes asociadas a las Descargas de Residuos Líquido a Aguas marinas y continentales superficiales (D.S. N° 90/2000), encontramos también la Norma de Emisión para la regulación de contaminantes asociadas a las Descargas de Residuos Industriales Líquidos a Sistemas de Alcantarillado(D.S. N° 609/98, Del Ministerio de Obras Públicas), Normas de Emisión de Residuos Líquido a Aguas Subterráneas (D.S. N° 46/02).



2.1.4.1 Delimitaciones de Emisiones según Normas.

La necesidad y grado de tratamiento de un agua residual, estará delimitado por las condiciones específicas de sus características en términos de aportes contaminantes y del cuerpo receptor al que se evacuen.

1) Norma de Emisión para la Regulación de Contaminantes Asociados a las descargas de residuos líquidos a Aguas marinas y continentales superficiales:

Se estipulan valores de emisión a cumplir para los siguientes escenarios

- Descarga de residuos líquidos a cuerpos de agua fluviales.
- Descarga de residuos líquidos a cuerpos de agua fluviales con capacidad de dilución.
- Descarga de residuos líquidos a cuerpos de agua lacustre.
- Descarga Marinas Dentro de la Zona de Protección.
- Descarga Marinas Fuera de la Zona de Protección.

A continuación se entregarán las tablas que contendrán los límites máximos permitidos para las descarga a cuerpos de aguas fluviales y agua lacustre, respectivamente. Los otros cuerpos nombrados se encuentran en Anexo 1.



Tabla 1: Límites máximos permitidos para la descarga de residuos líquidos a cuerpos de agua fluviales.

CONTAMINANTE	UNIDAD	LIMITE MAXIMO PERMISIBLE
Aceites y Grasas	mg/L	20
Aluminio	mg/L	5
Arsénico	mg/L	0,5
Boro	mg/L	0,75
Cloruros	mg/L	400
Coliformes Fecales o Termotolerantes	NMP/100 ml	1000
DBO ₅	mg/L	35 *
Fósforo	mg/L	10
Manganeso	mg/L	0,3
Nitrógeno Total Kjeldahl	mg/L	50
PH	Unidad	6,0 -8,5
Poder Espumógeno	mm	7
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	80 *
Sulfatos	mg/L	1000
Sulfuros	mg/L	1
Temperatura	C°	35
Hidrocarburos Fijos	mg/L	10
Zinc	mg/L	3

* =Para los residuos líquidos provenientes de plantas de tratamientos de aguas servidas domésticas, no se considerará el contenido de algas



Se podrán incrementar las concentraciones límites referente a la Tabla a, si las fuentes emisoras aprovechar la capacidad de dilución del cuerpo receptor. (Ver Anexo 1).

Tabla 2: Límites máximos permitidos para la descarga de residuos líquidos a cuerpos de agua lacustre:

CONTAMINANTE	UNIDAD	LIMITE MAXIMO PERMISIBLE
Aceites y Grasas	mg/L	20
Aluminio	mg/L	1
Arsénico	mg/L	0,1
Cobre Total	mg/L	0,1
Cianuro	mg/L	0,5
Coliformes Fecales o Termotolerantes	NMP/100 ml	1000-70*
DBO ₅	mg/L	35 *
Fósforo	mg/L	2
Manganeso	mg/L	0,5
Nitrógeno Total **	mg/L	10
PH	Unidad	6,0 -8,5
SAAM	mg/L	10
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	80
Sulfatos	mg/L	1000
Sulfuros	mg/L	1
Temperatura	C°	30
Zinc	mg/L	5

* =En áreas aptas para la acuicultura y áreas de manejo y explotación de recursos bentónicos, no se deben sobrepasar los 70 NMP/100 ml.

** =La determinación del contaminante corresponderá a la suma de las concentraciones de nitrógeno total kjeldahl, nitrito y nitrato.



2.2 DEPURACIÓN DE LAS AGUAS

La depuración de aguas es el nombre que reciben los distintos procesos implicados en la extracción, tratamiento y control sanitario de los productos de desecho arrastrado por el agua y procedente de viviendas e industrias (Hernández 1992). Existen hoy muchos tratamientos para la depuración de las aguas, todos estos implican la intervención del hombre, tanto para su construcción como para su óptimo funcionamiento. Sin embargo existe un método totalmente natural denominado “autodepuración”, este fenómeno se da en los cursos receptores (ríos, mares, etc.) con cargas de contaminantes muy por debajo de los tratamientos biológicos, físicos y fisicoquímicos. En este sentido, la presencia en el agua de altas concentraciones de contaminantes, tanto biodegradable como elementos no biodegradables, anula el proceso de autodepuración, se rompe el equilibrio y queda una zona contaminada que resultará difícil recuperar si no es de forma lenta y/o artificial.

Además este proceso está condicionado por las características del cauce; caudal, velocidad del flujo, oxigenación de las aguas, dilución y la actividad microbiana que se encarga de la degradación del contaminante.



2.2.1 AUTODEPURACION

La autodepuración de las aguas es un conjunto de fenómenos físicos, químicos y biológicos, que tienen lugar en el curso del agua de modo natural y que provocan la destrucción de materias extrañas incorporadas a un cauce natural. Principalmente son las bacterias aerobias, que consumen materia orgánica con ayuda del oxígeno disuelto en el agua, las causantes de la autodepuración. Además, hay que añadir las plantas acuáticas, que asimilan algunos componentes en forma de nutrientes, así como otros procesos fotoquímicos, diluciones, etc.

La capacidad de autodepuración de un río depende de los siguientes aspectos principales: el caudal; que permitirá diluir el vertido y facilitar su posterior degradación, la turbulencia del agua; que aportará oxígeno diluido al medio favoreciendo la actividad microbiana, la naturaleza y tamaño del vertido, la cantidad de contaminantes, la naturaleza de los contaminantes, el vertido esporádico o permanente de efluentes, la temperatura, y la capacidad de diluir los distintos materiales que afectan el ambiente acuático.

En los mecanismos naturales de autodepuración de un río se distinguen cuatro zonas según su contaminación y fase de depuración (Unda Opazo, 1998).



■ Zona de degradación próxima al vertido: Se produce al incorporarse las aguas contaminadas al río, apareciendo sólidos flotantes, turbidez, reducción de oxígeno por lo que desaparecen las formas de vidas más delicadas; algunos peces y algas, y aparecen otras más resistentes, aumenta la DQO. Comienza la biodegradación por parte de la flora microbiana.

■ Zona de descomposición activa: baja el oxígeno a cero para subir luego lentamente, aparecen aguas sucias, ennegrecidas, con espumas, apareciendo los flotantes y los olores desagradables debidos al sulfuro de hidrógeno, no viven peces, los organismos de descomposición orgánica trabajan activamente.

Existe una descomposición anaerobia que provoca un desprendimiento de gases (metano, hidrógeno, nitrógeno, ácido sulfhídrico). Cuando va disminuyendo la descomposición activa es cuando aumenta el oxígeno. En casos de fuerte contaminación y descomposición extremadamente activa puede retrasarse el paso a la zona siguiente.



- Zona de recuperación: reaparecen los vegetales y el agua se clarifica. Todo ello debido a la presencia de oxígeno disuelto gracias a la transferencia de oxígeno o/y procedente de la actividad fotosintética de los vegetales, que ayuda a degradar los compuestos contaminantes. El agua es más clara, y posiblemente se encontrará nitratos, sulfatos, fosfatos y carbonatos. La DBO va disminuyendo y se va elevando progresivamente el contenido de oxígeno hasta alcanzar su nivel normal.

- Zona de aguas limpias: se restauran las condiciones de la corriente naturales y el oxígeno disuelto esta cerca de la saturación donde se dan las características físico-químicas y la presencia de animales y vegetales acorde con la naturaleza del cauce.

La Figura 4 muestras el comportamiento del oxígeno en las distintas zonas

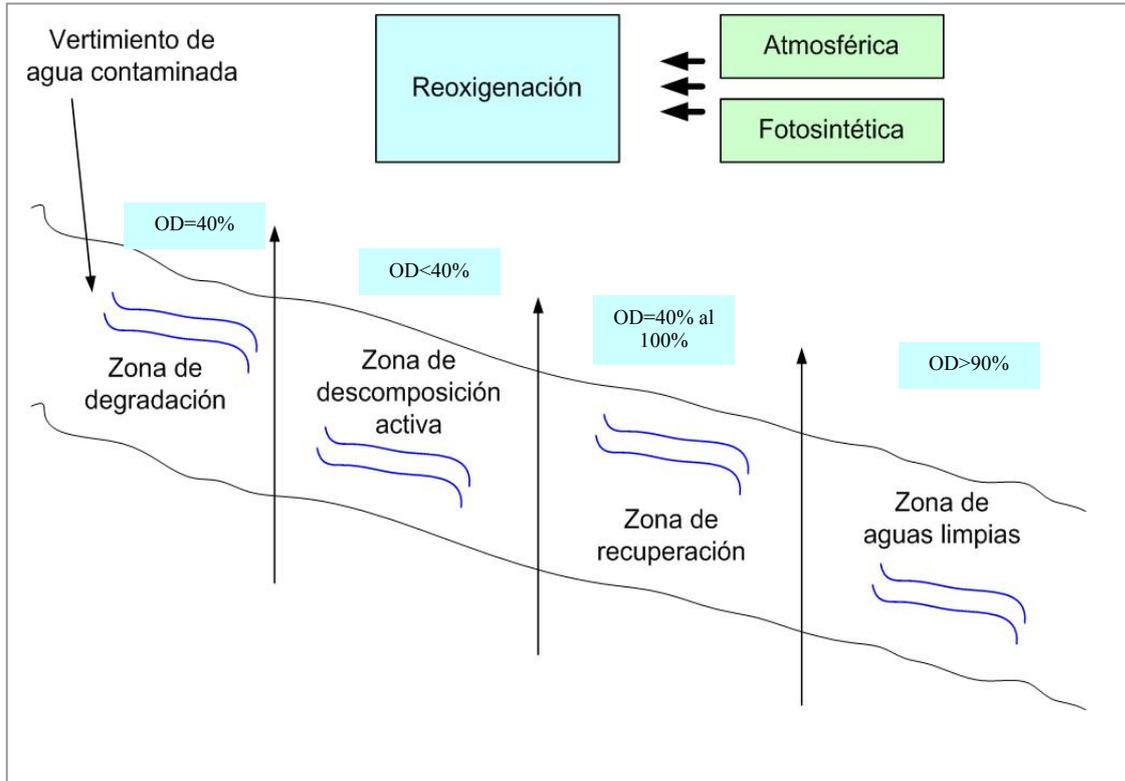


Figura 3: Balance de Oxígeno.



2.2.2 PARÁMETROS FÍSICOS Y QUÍMICOS DEL PROCESO

Para que el proceso de autodepuración en ríos exista se debe producir la degradación de los contaminantes vertidos al cauce. Se hace necesario, entonces, el estudio y comprensión de los parámetros más relevantes que participan en el proceso. En este trabajo se estudiarán parámetros como el Oxígeno disuelto, Temperatura, Turbidez y Turbulencia.

2.2.2.1 OXÍGENO DISUELTO

El contenido de oxígeno disuelto en agua (OD) es uno de los parámetros de calidad más característico de los cuerpos de aguas superficiales. La existencia de varias formas de vida acuáticas, y entonces, la existencia del ecosistema acuático en su conjunto depende de la provisión de oxígeno al agua y de su presencia y disponibilidad (en general pueden subsistir a concentraciones de OD superiores a 4 mg/l).

El contenido de OD disminuye debido al uso de oxígeno por parte de los múltiples procesos químicos, biológicos y bioquímicos que tienen lugar dentro del cuerpo de agua, tales como la respiración, la oxidación de la materia, la deposición de los sólidos entre otros. No obstante, otros procesos físico - químicos, reacciones y



procesos biológicos resultan en el incremento del oxígeno disuelto, como la fotosíntesis y la reaireación superficial.

Puede indicar contaminación elevada si el contenido de oxígeno es bajo, condiciones sépticas de materia orgánica o una actividad bacteriana intensa; por ello se le puede considerar como un indicador de contaminación, de la tasa de degradación de sustancias orgánicas e inorgánicas (susceptibles de ser oxidadas) y de la capacidad de autodepuración de corrientes superficiales.

Las descargas de vertidos con alto contenido de materia orgánica y nutriente, conducen al descenso de la concentración de oxígeno, por el incremento de la demanda para su degradación. En los casos en que la reducción de los niveles de oxígeno es severa se llega a condiciones anaerobias (déficit de OD superiores a 40%), especialmente en las zonas más profundas del cauce (ver cap. 2.2.1). El cálculo del déficit de OD es importante para el control de la contaminación del agua, en consecuencia, la baja solubilidad del oxígeno es uno de los factores limitantes en la capacidad de autopurificación de las aguas naturales, de allí se presenta la necesidad de efectuar alternativas al tratamiento de las aguas residuales, antes de descargarlas a las corrientes receptoras.



2.2.2.2 TEMPERATURA

La temperatura es un factor muy importante en la solubilidad del oxígeno y por lo tanto en la autodepuración de las aguas residuales. Dado que la velocidad de reacción del proceso bioquímico de degradación de la materia orgánica depende de la temperatura del sistema, esta influye en las actividades metabólicas de la población bacteriana, en la velocidad de transferencia de oxígeno y en la sedimentación de los sólidos biológicos (Cisterna, 2004). El conjunto de estos efectos se expresan matemáticamente en la constante de velocidad de reacción, en este caso μ , tal que:

$$\mu_T = \mu_o \cdot e^{(T-T_o)}$$

μ_T = Constante de velocidad de reacción a la temperatura T

μ_o = Constante de velocidad de reacción a $T=T_o$, la que corresponde a una temperatura de referencia, generalmente 20°C.

La figura 5 muestra la solubilidad del oxígeno (mg/l) en agua, tanto dulce como de mar. En ella queda claro que la solubilidad del oxígeno disminuye con el aumento de temperatura.

T°	Agua dulce(mg/l)	Agua de mar (mg/l)
0	10,29	7,97
10	8,02	6,35
15	7,22	5,79
20	6,57	5,31
30	5,57	4,46

Figura 4: solubilidad del oxígeno



2.2.2.3 TURBIDEZ

La turbidez es la expresión de la propiedad óptica de la muestra que causa que los rayos de luz sean dispersados y absorbidos en lugar de ser transmitidos en línea recta a través de la muestra.

La turbidez indica la cantidad de materia sólida suspendida en el agua y se mide por la luz que se refleja a través de esta materia. A mayor intensidad de luz dispersa, mayor nivel de turbidez. La materia que causa turbulencia en el agua incluye:

- Arcilla
- Fango
- Materia orgánica e inorgánica pequeña
- Componentes de color orgánicos solubles
- Plankton
- Organismos microscópicos

La turbiedad hace que el agua pierda su transparencia (ver figura 6). En lagos la turbiedad es debida a dispersiones extremadamente finas y coloidales, en los ríos, es debido a dispersiones normales, dependiendo del grado de turbulencia. Las partículas suspendidas absorben calor de la luz del sol, haciendo que las aguas



turbias se vuelvan más calientes, y así se reduce la concentración de oxígeno en el agua (el oxígeno se disuelve mejor en el agua más fría). Además algunos organismos no pueden sobrevivir en agua más caliente.

Las partículas en suspensión dispersan la luz, de esta forma decrece la actividad fotosintética en plantas y algas, que contribuye a bajar la concentración de oxígeno aún más.



Figura 5: Turbiedad de las aguas

La medición de la turbiedad, en una manera rápida que sirve para saber cuando, como y hasta que punto debemos tratar el agua para que cumpla con la especificación requerida.



2.2.2.4 TURBULENCIA

Otro fenómeno que es relevante en la autodepuración del agua es la turbulencia de estas (Ramalho, 1983). Este factor se puede explicar de acuerdo al Número de Reynolds que clasifica el flujo en Laminar y Turbulento.

Cuando el agua de un río fluye por su cauce sabemos que existen diferentes formas de flujo. Si la velocidad del agua es pequeña, entonces este flujo es regular; cuando el agua pasa por alguna piedra que está en el río, simplemente la rodea y el flujo continúa de manera regular. Se dice que el flujo es laminar, ya que su movimiento ocurre como si un conjunto de láminas de agua fluyera una sobre otra. Sin embargo, al aumentar la velocidad del agua llega cierto momento en que el flujo se vuelve turbulento plenamente desarrollado. Se logra apreciar que al bordear la piedra se producen remolinos. Si la velocidad del agua es mucho más alta todavía, aparecen remolinos dentro de los remolinos. En estas condiciones el flujo del agua es turbulento.

Estos dos escenarios, proporcionan diferentes valores en la oxigenación de las aguas, produciendo una mayor presencia de oxígeno (mg/L) en aquellas aguas que se encuentran con régimen turbulento (Unda Opazo, 1998).



2.3 TRANSFERENCIA FÍSICA DE OXÍGENO AL AGUA

La transferencia física ocurre cuando los niveles de oxígeno disuelto en el agua son inferiores a los de saturación (Metcalf and Eddy, 1996). El oxígeno debe ser transportado hacia la interfase aire-agua y de ahí a todo el volumen de agua. En la atmósfera el oxígeno se encuentra en una concentración del 21% en volumen y es esta misma concentración la que encontramos aproximadamente en la interfase aire-agua.

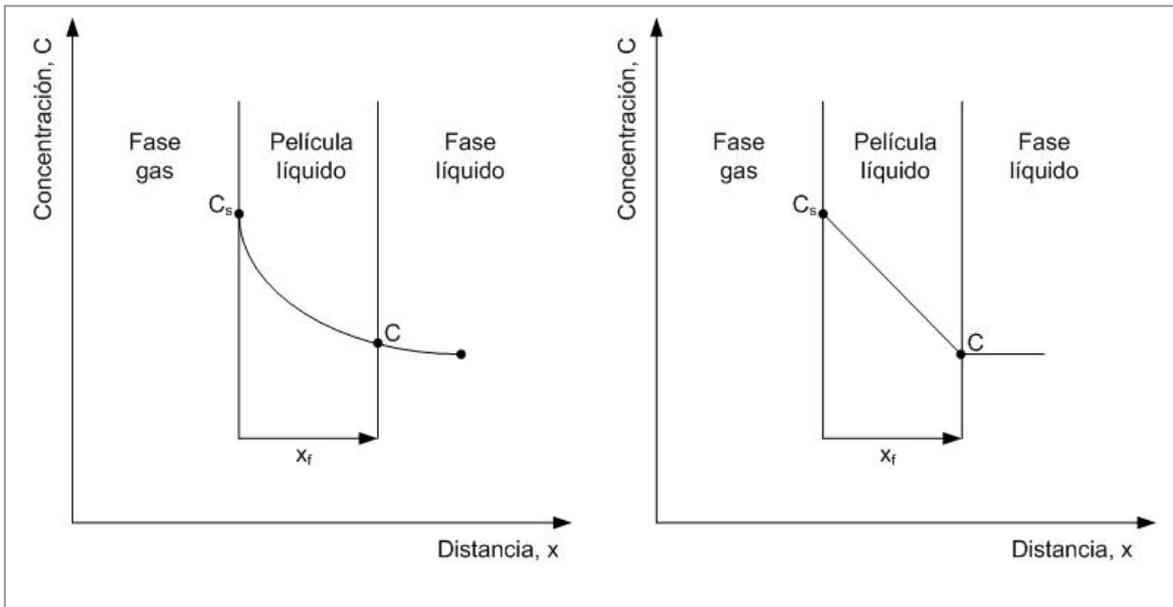


Figura 6: Interfase gas-líquido



La transferencia del oxígeno disuelto de la interfase al resto del lecho se produce mediante la difusión molecular y fenómenos asociados con la mezcla de la masa de agua debida al viento y a corrientes de agua principalmente. Para cuantificar la transferencia de oxígeno se pueden utilizar las mismas fórmulas que se utilizan para la reaireación en ríos (Kadlec y Knight, 1996). La ecuación de transferencia es la siguiente:

$$r = K * (C_{OD}^{SAT} - C_{OD}) \quad (2.3.1)$$

Donde:

- r: ganancia de oxígeno por unidad de tiempo y de volumen de agua debida a la reaireación superficial, g/m³.d.
- K: es la constante de reaireación o velocidad de reaireación superficial, en d⁻¹.
- C_{ODSat}: es la concentración de saturación de oxígeno disuelto, en g/m³.
- C_{OD}: es la concentración de oxígeno disuelto en la masa de agua, en g/m³.

Para la determinación del valor K, también, se puede emplear una aproximación basada en la disipación de energía:

$$K = C_e * \frac{\Delta h}{t_T} \quad (2.3.2)$$

Donde:



- Δh es la variación de la altura de la superficie del agua, en m.
- t_r es el tiempo de transporte, en d.
- C_e es el coeficiente de escape, en m^{-1} .

La variación del coeficiente de escape con la temperatura puede ser aproximada por la siguiente expresión:

$$C_{eT} = C_{e20} * 1,002^{(T-20)} \quad (2.3.3)$$

Donde:

- C_{eT} es el coeficiente de escape a la temperatura T, en m^{-1} .
- C_{e20} es el coeficiente de escape a 20°C, en m^{-1} ($C_{e20}=0,177 m^{-1}$).
- T es la temperatura del agua, en °C.

Para analizar en profundidad la transferencia de oxígeno es importante destacar que a lo largo del río existen pérdidas o ganancias de oxígeno y de cualquier constituyente, en la cual participan diferentes procesos que clasificaremos en procesos de transporte y procesos de transformación tales como advección, difusión, la reaireación, oxidación de la materia orgánica, entre otros.



2.3.1 PROCESO DE TRANSPORTE

Proceso que afecta de forma similar a los valores de todos los parámetros de calidad, encontramos:

2.3.1.1 Advección, o transporte de un constituyente como consecuencia del flujo del agua en el que el constituyente está disuelto o suspendido.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -U \frac{\partial C}{\partial x} \quad (2.3.4)$$

Donde C= concentración del constituyente, M/L³.

U= velocidad del agua en la dirección x, L/T.

t = tiempo, T.

2.3.1.2 Difusión: o transporte debido a la turbulencia de las aguas. Se puede describir como el fenómeno de mezclado localizado debido a la presencia de turbulencias, está provocado por las variaciones de velocidad y gradientes de concentración que se produce en las mismas.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[(E_x) \frac{\partial C}{\partial x} \right] \quad (2.3.5)$$

Donde E_x: coeficiente de difusión en la dirección x, L²/T.



2.3.2 PROCESO DE TRANSFORMACIÓN

Estos procesos dependen del constituyente específico a que se hacen referencia. Las expresiones de pérdida o ganancia de masa son variadas sin embargo nos referiremos a aquellas que interfieren en la variación del constituyente oxígeno.

2.3.2.1 Oxidación de la DBO

Se hará referencia a la oxidación de la DBO, sabiendo que dicho parámetro tiene relación con el medido en este estudio (DQO).

La oxidación de la DBO consume oxígeno y, por lo tanto representa un sumidero de oxígeno de las aguas del entorno. En primer lugar se oxida la DBO carbonosa, proceso al que sigue, entre ocho y 12 días después, la oxidación de la DBO nitrogenada. La oxidación de la DBO es un proceso de primer orden, siendo la velocidad de oxidación equivalente a la velocidad de eliminación de la DBO.

$$r_0 = -K * L \quad (2.3.6)$$

Donde

r_0 = Pérdida de oxígeno por unidad de tiempo y de volumen debido a la oxidación de la DBO, M/TL³.

L = concentración de DBO, M/L³.

K = constante de reacción de la oxidación de la DBO, T⁻¹.



En los análisis de oxígeno disuelto, la oxigenación de la DBO presenta una pérdida de oxígeno que se produce a la misma velocidad que la reducción de la DBO.

2.3.2.2 Demanda de Oxígeno de los sedimentos (DOS).

Representa el oxígeno consumido por la descomposición aerobia de los sólidos orgánicos que sedimentan esta dada por:

$$r_s = \frac{K_s}{H} \quad (2.3.7)$$

Donde:

r_s = consumo de oxígeno debido a la DOS por unidad de tiempo y volumen de agua, M/TL³.

H= profundidad del volumen de control, L.

K_s = tasa de consumo de oxígeno de los sedimentos, M/L²T. La tasa de consumo se puede estimar a partir de las velocidades de deposición de los sólidos, suponiendo que la velocidad de descomposición es igual a la de deposición.

$$k_s = \partial_0 a R_d \quad (2.3.8)$$

Donde:

∂_0 = contenido orgánico oxidable de los sólidos descargados.



a = relación estequiométrica entre oxígeno y sedimentos = 1,07.

R_d = velocidad de deposición de sólidos, M/L^2T .

2.3.2.3 Fotosíntesis y Respiración.

Cada organismo tiene características biológicas y bioquímicas particulares que son factores influyentes en la tasa fotosintética, por lo cual necesita un estudio particular para cada caso. Se define de forma general que;

r_p = Velocidad de producción de oxígeno por fotosíntesis por unidad de tiempo y volumen de agua, $M/ T L^3$.

r_{pp} = Velocidad de consumo de oxígeno por respiración por unidad de tiempo y volumen de agua, $M/ T L^3$.

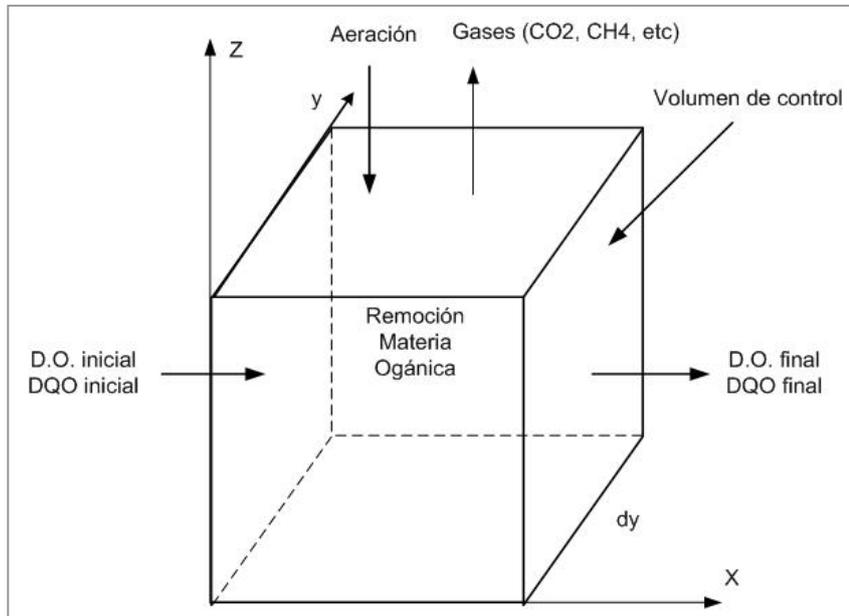


Figura 7: Efecto de la remoción de la materia orgánica en un curso de agua residual.

Existen otros constituyentes en el proceso que no serán considerados en este estudio, por no interferir de forma significativa en la transferencia de oxígeno como lo es; Deposición de los sólidos, Mortalidad Bacteriana, Adsorción, Volatilización (Metcalf and Eddy, 1996).



2.3.2.4 Demanda De Oxígeno en Canales Abiertos

Finalmente la forma de la ecuación de balance de masa para los constituyentes que se aplica a cada sección del curso de agua con el fin de obtener un valor medio representativo, queda dada por la siguiente expresión:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -U \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[(E_x + E_L) \frac{\partial C}{\partial x} \right] - KC \quad (2.3.9)$$

Donde: x= distancia longitudinal a lo largo del río, L.

E_L = coeficiente de dispersión longitudinal, L^2/T .

Para el caso del Oxígeno la ecuación de conservación de la masa, asumiendo condiciones estacionarias resulta:

$$0 = -U \frac{dC}{dx} - \underbrace{KL}_{\text{Demanda de OD para la oxidación}} + \underbrace{K_2(C_s - C)}_{\text{Reaireación}} + \underbrace{\left(r_p - r_{Rp} - \frac{k_s}{H} \right)}_{\text{Fotosíntesis, respiración demanda OD sedimentos}} \quad (2.3.10)$$



Observamos la curva del Déficit de Oxígeno como sigue:

$$D = \underbrace{\frac{KL_0}{K_2 - K} (e^{-Kt} - e^{-K_2t})}_{\text{Eliminación de DBO}} + \underbrace{D_0 e^{-K_2t}}_{\text{Déficit inicial}} - \underbrace{\frac{r_p - r_{Rp} - K_s / H}{k_2} (1 - e^{-K_2t})}_{\text{Fotosíntesis, respiración demanda OD sedimentos}} \quad (2.3.11)$$

2.3.3 CAPATACIÓN DE OXÍGENO EN CAÍDAS DE AGUAS

El efecto de oxigenación para una cascada o caída de agua esta dado por la siguiente ecuación:

$$r = \frac{C_S - C_A}{C_S - C_B} \quad (2.3.3.1)$$

C_S = Saturación de oxígeno mg/l.

C_A = Contenido de oxígeno, aguas arriba del vertedero o cascada.

C_B = Contenido de oxígeno, aguas abajo del vertedero.



El valor de r puede estimarse por la fórmula experimental (Hernández, 1992).

$$r = 1 + 0,11 * a * b * (1 + 0,046 * T) * \frac{10h}{3} \quad (2.3.3.2)$$

Donde

T= temperatura del agua

H=altura de la caída en m.

a = 1,25 para ríos no contaminados.

1,00 para ríos contaminados.

0,80 para agua residual bruta.

b = 1,0 para caída simple.

1,3 para cascada múltiple.



2.4 ELEMENTO HIDRÁULICO: CANAL ABIERTO.

Un canal abierto es un conducto en el cual el agua fluye con una superficie libre. De acuerdo con su origen un canal puede ser natural o artificial (Ven Te Chow, 1994).

Los canales artificiales con propósitos experimentales se diseñan y se construyen para conducir volúmenes determinados de agua desde un origen hasta un destino.

Esta investigación se basará en canales artificiales construidos en laboratorio con pendiente de fondo constante, presencia de compuerta hidráulica y caída hidráulica, que conducirán el flujo de agua residual hasta un recipiente final con una velocidad regida por la siguiente ecuación:

$$v = \frac{1,00}{n} R^{2/3} S_o^{1/2} \quad (2.4.1)$$

Donde:

- v es la velocidad promedio del flujo (en m/s).
- R es el radio hidráulico (en m), o cociente entre el área mojada y el perímetro mojado.
- So es la pendiente del fondo del canal (adimensional).
- n es un factor de resistencia a menudo llamado n de Manning. (Ven Te Chow, 1994).



2.4.1 PROPIEDADES DE CADA EXPERIENCIA

2.4.1.1 CANAL BASE

El canal base consiste en un canal abierto de sección rectangular, por el cual pasarán las aguas residuales con pendiente de fondo de constante.

Se espera encontrar un flujo turbulento plenamente desarrollado durante el intervalo de tiempo en consideración, cuyo flujo se transporta a presión atmosférica desde un punto a otro y con un fin determinado.

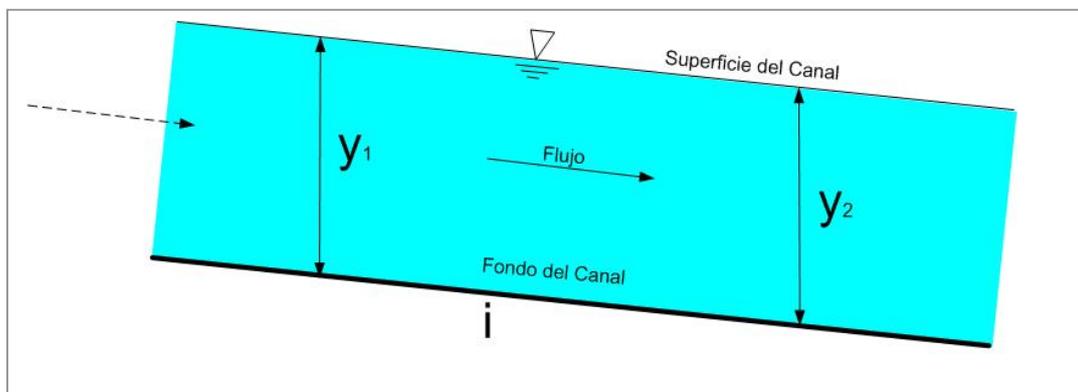


Figura 8: Canal Base.



2.4.1.2 CANAL CON COMPUERTA HIDRÁULICA

La compuerta es una estructura de control hidráulico. Su función es la de presentar un obstáculo al libre flujo de agua con el consiguiente aumento de la velocidad aguas abajo (Ven Te Chow). Con dicho aumento de la turbulencia del flujo se espera el aumento de la oxigenación antes y después de la compuerta reflejado por un esperado aumento del volumen del agua residual (Ven Te Chow). La compuerta utilizada se denomina compuerta de flujo por debajo debido al hecho de que el agua pasa por debajo de la estructura (Domínguez, 1959).

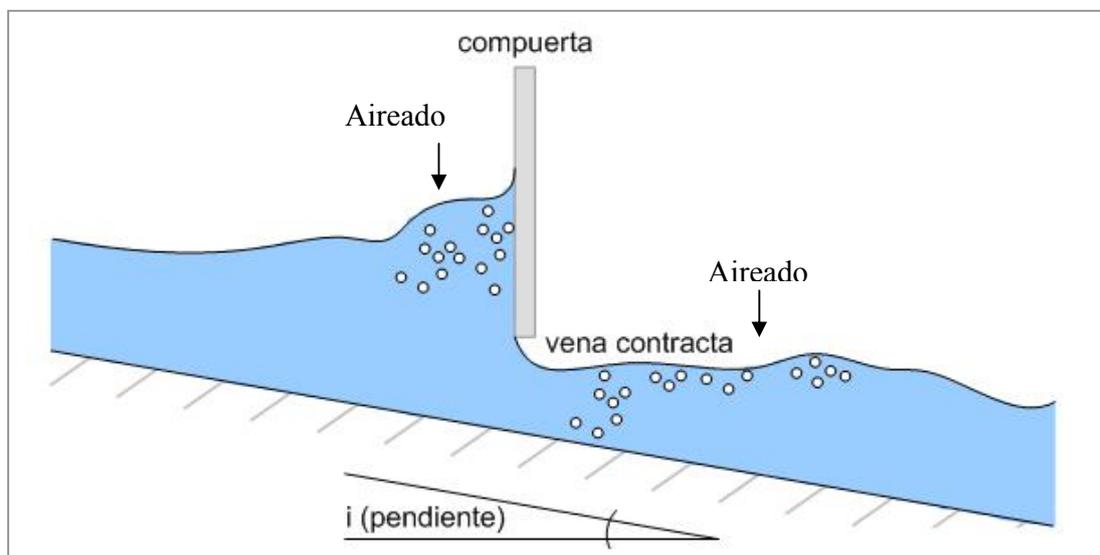


Figura 9: Canal con Compuerta.



2.4.1.3 CANAL CON CAÍDA HIDRÁULICA.

La caída libre es un fenómeno local en la hidráulica y ocurre cuando existe una discontinuidad en el fondo de un canal plano. Si el cambio en la profundidad de flujo desde un nivel alto a un nivel bajo es gradual, el flujo se convierte en flujo gradualmente variado (Ven Te Chow, 1994).

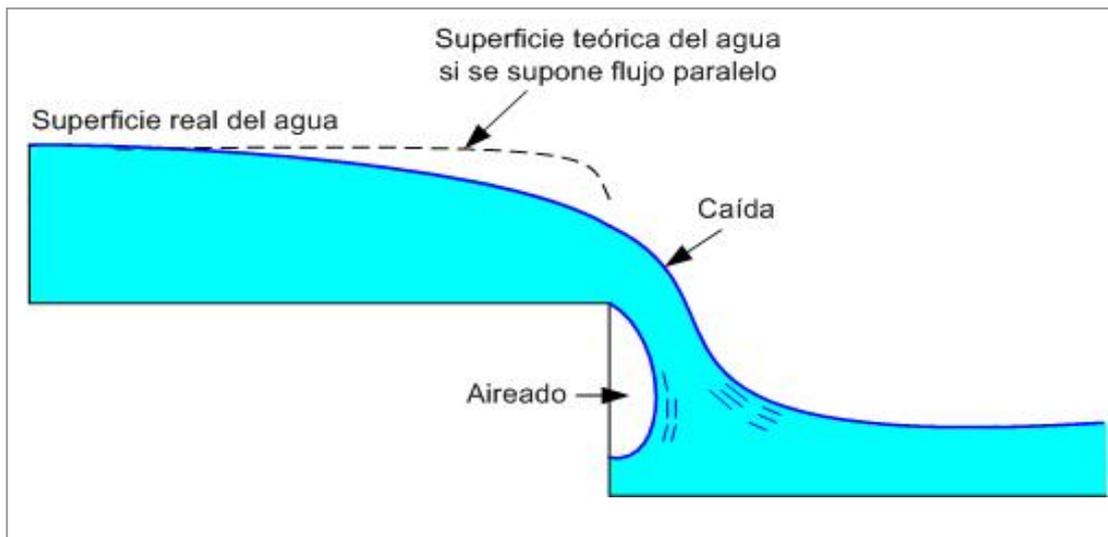


Figura 10: Canal con Caída Hidráulica.



CAPITULO 3

3. ETAPA EXPERIMENTAL

En esta etapa se construirán todos los escenarios físicos y se tomarán las muestras necesarias, con el fin de cumplir el objetivo del estudio.

3.1. METODOLOGÍA

Para llevar a cabo el estudio de la variación de la DQO de aguas residuales sintéticas, se tomaron en laboratorio 21 muestras de DQO y 4 de OD, cada una de ellas envasadas y trasladadas al laboratorio para su posterior análisis. Dichas muestras fueron tomadas en un canal abierto de 4m de longitud, 10cm de ancho y 30cm de alto, y cuya implementación se realizó con el fin de lograr las condiciones hidráulicas deseadas; pendiente fondo continua, presencia de compuerta y caída hidráulica.

La etapa experimental tendrá como curso inicial la comprobación de su perfecto funcionamiento. Esto incluye verificar que efectivamente el canal no presente filtraciones. La segunda etapa consiste en la mezcla y lanzamiento de las aguas residuales sintéticas y una etapa final que consiste en la toma de muestras.



Se comenzará siempre, independiente de la experiencia que se esté realizando, por la pendiente de 3%. Luego al canal con esta pendiente se le añadirá un tramo de 2m., que tiene como objeto que el flujo pase por el canal de forma homogénea. Por último se trabajará, en el canal respectivo, con pendiente del 1%. Se seguirán analizando aquellas experiencias que proporcionen mejores resultados, hasta poder diferenciar cual de ellas reduce en mayor número el valor de la DQO. Todo esto ayudado por elementos complementarios tales como; un recipiente de mezcla, un tanque de alimentación, un tramo para la homogeneización del flujo entrante entre otros, para el posterior muestreo y perfecta ejecución del trabajo.

Para finalizar el estudio se realizarán mediciones en terreno (ver figura 11.d), tanto de DQO (45 análisis) como de OD (15 análisis) en canales reales ubicados en nuestra Universidad, para comparar los resultados de campo frente a los obtenidos en laboratorio.

Las aguas residuales serán sintéticas, con presencia de sacarosa, como fuente orgánica, y de nutrientes que serán aportados por el nitrógeno y fósforo, elegidos por ser los principales elementos nutritivos (Metcalf and Eddy, 1995).

Estos elementos serán medidos cuidadosamente para obtener los niveles exactos, tanto de materia orgánica como de nutrientes.

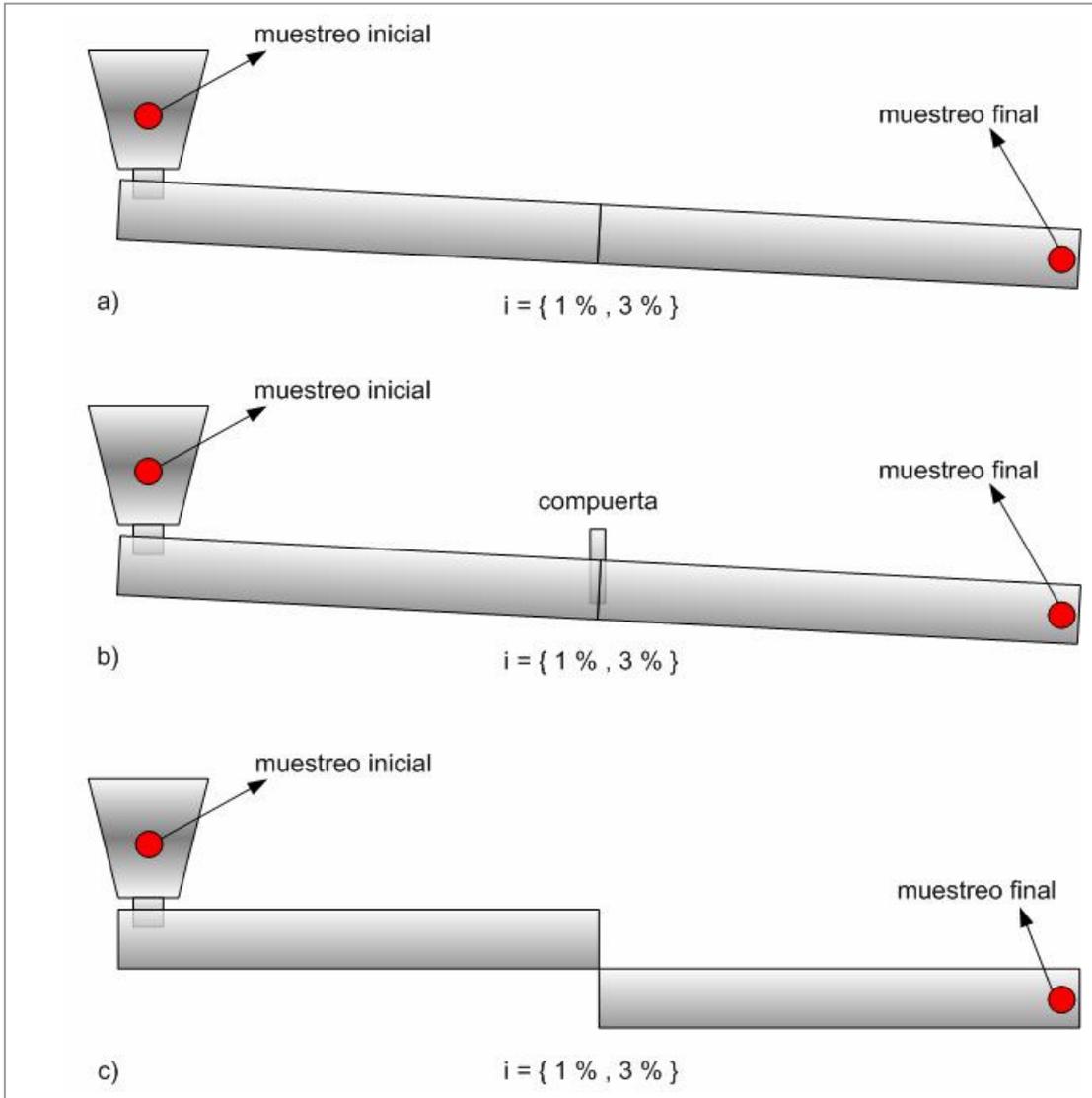


Figura 11: Puntos de muestreo de DQO y OD (de acuerdo a cada experiencia) en laboratorio.

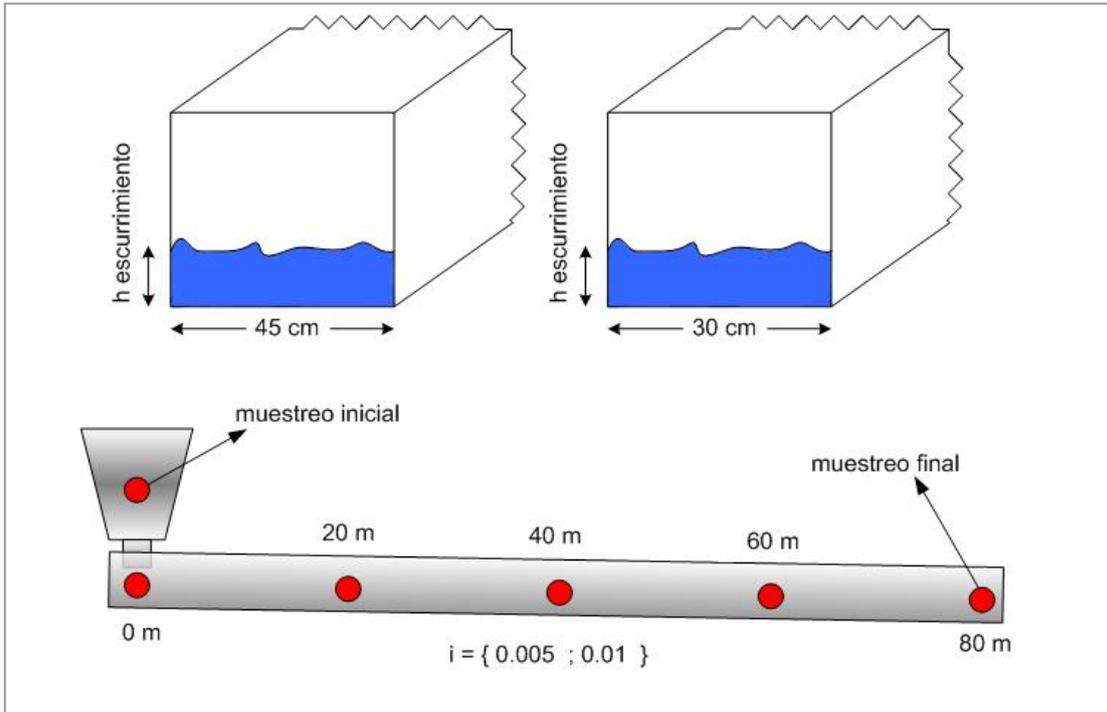


Figura 11.d.: Puntos de muestreo de DQO y OD en Terreno.



3.2. CARACTERÍSTICAS Y DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA.

El sistema cuenta fundamentalmente con un canal abierto de sección rectangular, cuyas dimensiones fueron escogidas con el fin de obtener muestras representativas y fiables, además de poder lograr los diferentes fenómenos hidráulicos ya mencionados. Complementado el sistema con otros dispositivos anexos, que en conjunto logran un buen trabajo.

El procedimiento para la obtención de los canales y sus respectivas muestras fue la siguiente:

■ Canal Base

Este canal abierto con flujo libre, pendiente de fondo y sección invariable, establece la base de trabajo y permite realizar los análisis comparativos. En el se tomarán los datos que servirán de referente y/o de parámetros de comparación para el estudio. De sección rectangular, construidos de acrílico y con las siguientes dimensiones: 0,3 x 0,1 x 4m constituirá la pieza fundamental del sistema.



Para la identificación de cada una de las experiencias y posteriores resultados se le ha denominado como sigue (ver fig. 11.a):

- “Experiencia 1.a”: Canal base con pendiente de un 3% a lo largo de toda su longitud.
- “Experiencia 1.b”: Canal base con pendiente de un 1%.
- “Experiencia 1.c”: Canal base con pendiente de un 3% se incorpora al inicio del canal un tramo de canal sin pendiente.

La figura 12 muestra la experiencia 1.a: canal base con pendiente del 3%.



Figura 12: Canal Base laboratorio.



■ Canal con Compuerta.

Al canal abierto base se le incorporará una placa de 20 x 10cm en la mitad de la longitud del canal base, para que actúe como compuerta con el objetivo de provocar turbulencia aguas abajo y con ello la oxigenación de las aguas residuales, mediante la presencia natural de oxígeno. La altura de la contracción es de 3cm.

Se usa el mismo método que en el canal base para la identificación de las experiencias del canal con compuerta (ver fig. 11.b):

- “Experiencia 1.a”: Canal con Compuerta y pendiente de un 3% a lo largo de toda su longitud.
- “Experiencia 1.b”: Canal con Compuerta y pendiente de un 1%.
- “Experiencia 1.c”: Canal con Compuerta y pendiente de un 3%, se incorpora al inicio de el canal un tramo de canal sin pendiente.

La compuerta siempre se mantendrá a la misma distancia del fondo del canal (3cm), con el fin de que no constituya una nueva variable en el estudio. Esta compuerta al igual que el canal será de acrílico y se situará en la mitad de la longitud del canal.



La figura 13 muestra como se origina turbulencias antes y después de la compuerta.

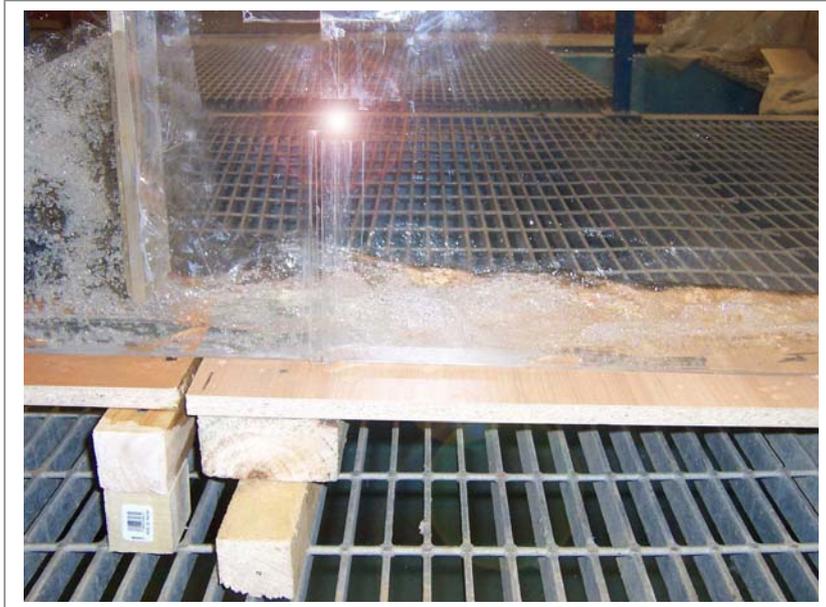


Figura 13: Canal con Compuerta hidráulica.



■ Canal con Caída Hidráulica.

Resulta del segundo cambio del canal base, mantiene sus dimensiones (0.3 x 0.1 x 4m) y sección rectangular, pero ahora el largo resultará de dos tramos de 2m cada uno, generándose la esperada aeración de las aguas residuales en la caída que estará justo a los dos metros desde el inicio del canal (ver fig. 14).

La altura a la que se separarán estos tramos y que generará la caída, será la equivalente a las pendientes del canal base, es decir, para la pendiente del 3%, la altura en la caída del agua de piso a piso es de 12cm y para la pendiente del 1% es de 4cm.

Las experiencias se denominan (ver fig. 11.c):

- “Experiencia 1.a”: Canal con Caída de 12cm de altura.
- “Experiencia 1.b”: Canal con Caída de 4cm de altura.
- “Experiencia 1.c”: Canal con Caída de 12cm de altura, se incorpora al inicio de el canal un tramo de canal sin pendiente.



Figura 14: Canal con Caída Hidráulica.

■ Tanque de Mezcla

Corresponde al tanque donde se mezclan los distintos compuestos para conseguir el agua residual sintética deseada. Con capacidad máxima de 40 litros.



Figura 15: Tanque mezcla.



■ Tanque de alimentación

Este tanque cumple el rol de alimentar a los canales, con aguas residuales, cuya evacuación se realizará por la parte inferior de éste a través de una sección circular de 110mm, dada por un codo de 90°. Contendrá 40litos de mezcla(fig.16).



Figura 16: Tanque alimentador.

■ Frascos de Muestras

Estos frascos contendrán el agua residual sintética para el posterior análisis. Tienen una capacidad de un litro cada uno y se deben mantener en frío para no variar las propiedades de las aguas contenidas en él (fig. 17).



Figura 17: Contenedor de muestras



■ Tramo de homogeneización del flujo

Este tramo tiene como único objetivo la homogeneización del flujo antes de entrar al canal. Por lo que se eligió canaletas de aguas lluvias de 20 x 10 x 2m.



Figura 18: Tramo Anexo.

■ Termómetro.

El termómetro permitirá medir la temperatura que posean las aguas residuales antes de ser envasadas, teniendo en consideración que la temperatura es un parámetro físico importante e inverso a la solubilidad del oxígeno.



■ Pesa.

Pesa de alta precisión de hasta 0,01 gramos. Permitirá con gran exactitud alcanzar los valores deseados para generar las aguas residuales sintéticas (fig. 19).



Figura 19: Pesa Precisión.

■ Otros: Mangueras, soportes, codo.

El sistema se compone, además, por otros elementos que hacen posible el perfecto funcionamiento del sistema final; entre ellos una manguera, que permite el llenado del sistema alimentador; un codo de PVC 110 mm, que conecta el sistema alimentador con la entrada del canal; un sistema de soporte, construido como sostenedor del canal para sus diferentes condiciones.



3.3 ANTECEDENTES PREVIOS A LA EJECUCION

Se debe tener en cuenta las siguientes consideraciones antes de realizar el experimento:

3.3.1 Alimentación del Sistema

Las distintas experiencias serán alimentadas con aguas residuales sintéticas, utilizadas en tesis anteriores con excelentes resultados (Chavarría, 2003; Mardones, 2004; Arellano, 2005). Constituidas fundamentalmente en base a sacarosa ($C_{12}H_{22}O_{11}$), carbohidratos que para una determinada cantidad proporcionaron la DQO que se necesitaba alcanzar.

Conjuntamente con el aporte de sacarosa, como materia orgánica, se requirió la presencia de nutriente para esta agua, recurriendo sólo al nitrógeno y fósforo por ser éstos los nutrientes más utilizados.

De los trabajos anteriormente realizados se establece la siguiente relación.

$$1 \frac{g}{l} C_{12} H_{22} O_{11} \Rightarrow 1.3 \frac{gDBO}{l} \Rightarrow 1.5 \frac{gDQO}{l}$$

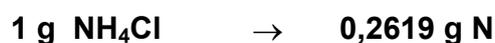
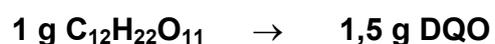


Al igual que el aporte de DQO proporcionado por la sacarosa, el aporte de los nutrientes tal como el nitrógeno y el fósforo se realizó a través de compuestos que arrojaron buenos resultados en estudios anteriores (Chavarría, 2003).

Es así como el Nitrógeno será proporcionado por el Cloruro de Amonio (NH_4Cl), compuesto que tiene como peso molecular 53,492 lo que significa que el nitrógeno corresponde al 26,19 % del compuesto total.

Por otra parte la contribución de Fósforo será otorgada por el Fosfato Trisódico (PO_4Na_3) con un peso molecular de 163,94 lo que significa que el fósforo corresponde al 18,89 % del compuesto total.

Se puede entonces obtener la cantidad de nitrógeno y fósforo contenida en 1g de Cloruro de amonio y de Tripolifosfato de sodio respectivamente.





Con estos antecedentes y con las relaciones que se definen en la tabla c, se pudo obtener los datos de entrada, tanto de DQO como de nitrógeno y fósforo, requeridos para las distintas cargas utilizadas.

Los datos iniciales utilizados en esta tesis se presentan en la siguiente tabla:

	DBO	DQO	N	P	C ₁₂ H ₂₂ O ₁₁ (g)	NH ₄ Cl(g)	PO ₄ Na ₃ (g)
Tesis		90	28	3,5	0,06	0,0185283	0,1069
Para 40litros		90	28	3,5	2,4	0,741132	4,276
DS 90	30		30	3			

Tabla 3: Medidas de DQO y nutrientes.

Los valores tanto de DQO, N, como de P, fueron escogidos de forma que representen los efluentes de las plantas de tratamiento de la región, las cuales fluctuaban entre 90 a 270mg/l de DQO (Araya, 2006).

3.3.2 Área y Pendientes Escogidas para el Canal.

Como se señaló anteriormente el área del canal base se eligió de forma tal que al ser modificado se presenciarán los fenómenos hidráulicos esperados. Su longitud de 4 metros (unión de dos paneles de dos metros cada uno) permite separar los paneles de acrílico a la mitad, para originar la cascada o caída hidráulica.



El ancho del canal de 10cm y el alto del canal 30cm, facilitará alcanzar una altura de escurrimiento considerable para nuestro volumen de agua y a la vez realizar muestreos representativos de las aguas, favoreciendo la dispersión de la materia orgánica en el flujo.

3.3.3 Características del Acrílico.

El acrílico fue se escogido como el material para la construcción de los canales por contar con las siguientes propiedades y/o características:

■ Resistencia a la intemperie

Los acrílicos pueden estar expuestos a la intemperie por largos períodos de tiempo y no demuestran cambios significativos en color o propiedades físicas.

■ Ópticas

La transmisión de luz visible es del 92%, siendo igual a la del vidrio óptico.

■ Resistencia al Impacto

Para uso general una resistencia de 0.2 a 0.5 Libra-pie/pulgada, aproximadamente 6 veces mayor a la del vidrio.



■ Resistencia a Químicos

Es resistente al agua, ácidos diluidos hidrocarburos alifáticos.

■ Ligereza

Peso específico de 1,19 g/cm cúbico, es 50% más ligero que el vidrio, 43% más ligero que el aluminio.

■ Dureza

Similar a la de los metales no ferrosos como el cobre y el latón., tiene una dureza Barcol 50 unidades.



3.3.4 Tipos y Conservación de las Muestras

Para este trabajo se realizaron muestras puntuales, con toma manual en envases de plásticos con capacidad de un litro y conservadas en frío, para no alterar el posterior análisis. A continuación se hará referencia a distintas alternativas:

■ Tipos de muestras

a) Muestras Puntual o de Sondeo: Estrictamente hablando, una muestra recogida en un lugar y un momento determinados sólo puede representar la composición de la fuente en ese momento y lugar.

b) Muestras compuestas: En la mayoría de los casos se refiere a una mezcla de muestras sencillas recogidas en el mismo punto en distintos momentos. Con este objeto, se considera como estándar para la mayoría de los análisis una muestra compuesta que represente un periodo de 24 horas.

c) Muestras integradas: En algunos casos, la información necesaria se obtiene mejor analizando mezclas de muestras individuales recogidas en distintos puntos al mismo tiempo o con la menor separación temporal posible.

■ Métodos de toma de muestra

a) Toma manual: En la toma manual se supone que no se utiliza equipo alguno, pero este procedimiento puede resultar demasiado costoso en tiempo.



b) Toma automática: Mediante la toma automática se pueden eliminar los errores humanos en la manipulación, se reducen los costes laborales y se proporciona la posibilidad de hacer tomas con mayor frecuencia.

■ Envases

En general, los envases están hechos de plástico o vidrio, y según los casos puede resultar preferible uno u otro de los materiales. Para muestras que contienen compuestos orgánicos conviene evitar los envases de plástico, salvo los fabricados con polímeros fluorados como el politetrafluoretileno (TFE).

■ Conservación de las muestras

Con independencia del tipo de muestras de que se trate, nunca puede conseguirse la estabilidad completa de todos sus componentes. Para conservar mejor las muestras del estudio se mantuvieron rodeadas de hielo (ver figura 17).



3.4 FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA.

Cada experiencia realizada simulará la descarga de un efluente desde una planta de tratamiento de aguas residuales hacia un cauce natural, por lo que se respetarán los límites máximos permitidos para la descarga de contaminantes a los cuerpos de aguas indicados en la Norma (Ver el punto 2.1.4.1).

Para que se logre la oxidación de la materia orgánica, aportada por la sacarosa en el sistema, es necesario que el flujo se ponga en contacto con el ambiente permitiendo así la transferencia del oxígeno hacia las aguas.

La duración de las aguas residuales en cada canal dependerá exclusivamente de las características y/o propiedades que se le va dando al canal base y de la experiencia que se está realizando.

Una vez reconocido el mejor modelo y/o escenario se procederá a trabajar con una pendiente del 2%, en el canal ya elegido, con el objetivo de especificar la real importancia del valor de la pendiente con respecto a la variación de la DQO. Para luego realizar muestras en distintos puntos del canal, con el objetivo de analizar acabadamente las variaciones de la DQO en relación a la incorporación del fenómeno en dicho canal.



Inicialmente las muestras puntuales serán realizadas al final del canal, una vez transcurridos los fenómenos hidráulicos inducidos para cada experiencia. Luego se procederá a verificar la confianza de las muestras puntuales, volviendo a analizar, en cada una de las 3 etapas aquella experiencia que obtuvo el mejor resultado, a través de una muestra compuesta originada del promedio de 10 muestras puntuales. Ya con la confianza que otorgan estos resultados se procede a diferenciar el mejor método en la variación de la DQO.

3.4.1 DESCRIPCIÓN DE LOS PROCEDIMIENTOS

Cada experiencia tendrán en común las siguientes etapas:

■ **Peso de los Distintos Componentes:** Se pesarán los distintos componentes, hasta alcanzar la cantidad necesaria tanto de DQO como de nutrientes descrita en la tabla 3.

■ **Llenado del estanque alimentador:** Se llenará el tanque de mezcla con 40 litros de agua y se le añadirán la sacarosa y los compuestos que aportarán el fósforo y el nitrógeno. Luego se mezclarán suave y minuciosamente, para evitar una oxigenación adicional y la presencia de grumos de algunos de los compuestos.



■ **Descarga de las aguas residuales al canal:** La descarga se realizará desde el estanque alimentador hacia el canal por medio de un codo de PVC 110 mm. Este codo está conectado con el estanque y poseerá una tapa que se abrirá para liberar la mezcla. La descarga se realizará de dos formas diferentes hacia el canal, dependiendo de la experiencia a realizar. Una en forma directa al canal y otra descarga que va desde el estanque pasando por un tramo de 2m de largo, que tiene por objetivo homogeneizar el flujo, hasta llegar a la entrada del canal.

■ **Toma de Muestras:** Se realizarán toma de muestras en puntos determinados del canal. La primera muestra se realiza en el estanque de mezcla, para verificar si la DQO inicial in situ es igual a la DQO teórica inicial calculada en la tabla 3, luego se tomarán muestras al final del canal. Esto se repetirá para cada experiencia.

■ **Toma Promedio de una Muestra:** Se procederá a tomar 20ml de cada lanzamiento realizado (10 lanzamientos), que serán depositados en un recipiente para luego mezclarlos y almacenarlos en el frasco final, para su posterior análisis.



3.4.2 PERFECCIONAMIENTO DEL SISTEMA

En esta etapa se consiguió eliminar las filtraciones, tanto en la salida del estanque alimentador como a lo largo del canal. Además se eliminaron pequeños errores en las alturas del soporte, logrando así las pendientes deseadas inicialmente.

Este proceso se realizó con agua potable hasta lograr las condiciones óptimas para las distintas experiencias, con el fin de evitar un error en las mediciones.

Con la corrección de lo descrito anteriormente, se evitó un error adicional y también un encarecimiento del proyecto final.

3.4.3 DESCRIPCION Y DESARROLLO DE LA TOMA DE MUESTRA PARA CADA EXPERIENCIA

El proyecto constará de tres etapas, una para cada canal (ver capítulo 3.2), cada etapa estará constituida por tres experiencias diferentes. Evolucionando durante su ejecución, cada una de éstas, de la siguiente forma:



3.4.3.1 Canal Base

La primera muestra de DQO tomada se realizó en el estanque de mezcla con el objetivo de corroborar la DQO inicial, muestra que fue depositada en el envase sin ninguna complicación, el día 22 de febrero con una temperatura del agua residual de 22,6 C°. Luego de ejecutada ésta se procedió a tomar las muestras de DQO siguientes:

➤ **Experiencia 1.a:** La muestra fue tomada al final del tramo del canal (acción que se realizará para todas las experiencias por lo que no se volverá a enunciar el punto de muestreo), transcurridos 15 min. tomada la primera muestra. No presentó ningún evento inesperado.

➤ **Experiencia 1.b:** En esta experiencia al canal base se le disminuye la pendiente de fondo a 1 % y la muestra se realizó con total normalidad.

➤ **Experiencia 1.c:** Antes de realizar la muestra se añade el tramo sin pendiente al inicio del canal base con pendiente de 3% y se ubica el tanque de alimentación al comienzo de este tramo. Luego de lanzadas las aguas se procede a tomar la muestra de agua residual.



En la figura 20 se aprecia la toma de muestras al final del canal.



Figura 20: Toma de muestra de agua residual en canal base.



3.4.3.2 Canal con Compuerta Hidráulica

➤ **Experiencia 2.a:** Para realizar esta experiencia, al canal base con una pendiente del 3% se le añade una placa mostrada en la figura 21, en la mitad de su longitud y se toma la muestra de forma normal al final del tramo.

➤ **Experiencia 2.b:** La muestra fue tomada en las mismas condiciones que la experiencia anterior, pero con una pendiente de un 1% y sin ninguna anomalía.

➤ **Experiencia 2.c:** La muestra de agua residual fue tomada una vez unido el tramo sin pendiente, no hubo inconvenientes y deposita como todas las anteriores en el contenedor de muestras que le asegura gracias a su temperatura mantener las propiedades de éstas.

Se ve claramente en la figura 21 la presencia de una compuerta de acrílico.



Figura 21: Canal Compuerta experiencia 2.c



3.4.3.3 Canal con Caída Hidráulica

- **Experiencia 3.a:** La altura de separación de los pisos es de 12cms, equivalente a la pendiente del 3% del canal base.
- **Experiencia 3.b:** En esta experiencia la separación de los fondos del canal son equivalente a una distancia vertical de 4 cm. La muestra al igual que las anteriores se realiza en total normalidad.
- **Experiencia 3.c:** Esta experiencia se realiza en el canal anterior pero añadiéndole un tramo de 2 metros de longitud. Luego se procede a efectuar la prueba sin ningún inconveniente.



Figura 22: Canal Caída experiencia 3.a.



3.4.3.4 ANÁLISIS DE PENDIENTE

El estudio de laboratorio continúa con el cambio de altura de la caída adquiriendo un valor 8cm (fig. 23). Se elige este canal por presentar mayor variación de DQO. Con este punto se desea observar una tendencia clara entre la altura de la caída y la reducción de la variable DQO.

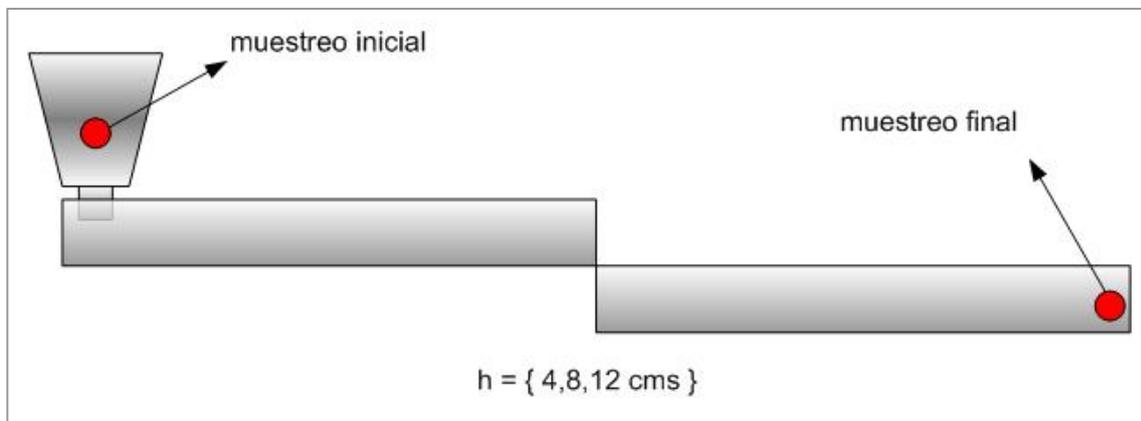


Figura 23: Variación del valor de la altura de la caída.



3.4.3.5 Detalles de la Variación de DQO en la Caída Hidráulica:

Los resultados anteriores permitirán dar el siguiente paso, y realizar cuatro mediciones puntuales, en cuatro puntos cuidadosamente seleccionados, para confirmar donde se produce la mayor variación de la DQO dentro del tramo del canal elegido por arrojar el mejor resultado en variación de la DQO. Estos análisis fueron tomados en el mes de mayo registrando, las aguas residuales, una temperatura de 17,8° C.

En la figura 24 se visualizan los puntos escogidos para realizar las muestras de DQO.

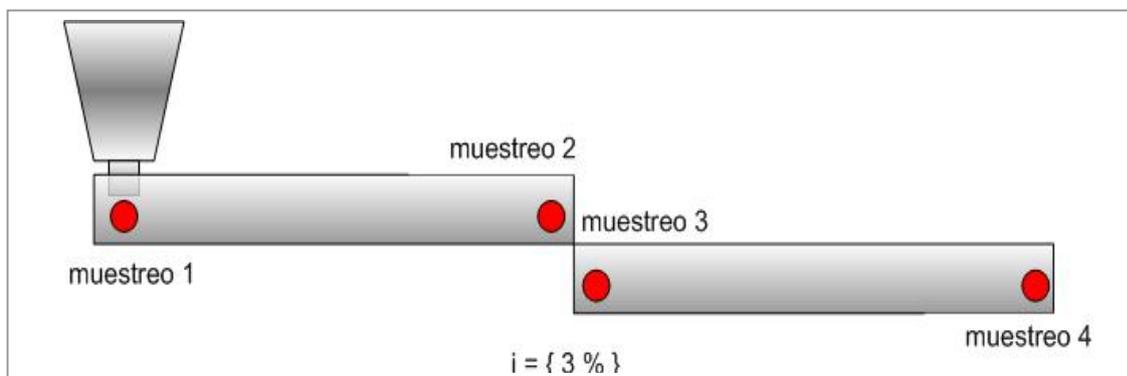


Figura 24: Muestreo detallado en el canal con caída hidráulica.



3.4.3.6 Análisis Compuestos.

Con los resultados de todas las muestras anteriores se procede a seleccionar, como se mencionó anteriormente, de cada etapa la experiencia con mayor variación en el valor de la DQO y se vuelven a realizar dichas experiencias. Cada una se realizará 10 veces y se extraerá de cada lanzamiento 20 ml, los cuales se reúnen en un frasco alcanzando 200ml que son depositados en el frasco de muestreo y entregado al laboratorio (fig. 25). Con esto se espera eliminar el error propio de una muestra puntual. Con la confianza de una muestra compuesta se procede a realizarle a estas muestras promedio análisis de OD, en los puntos señalados en la figura 11.

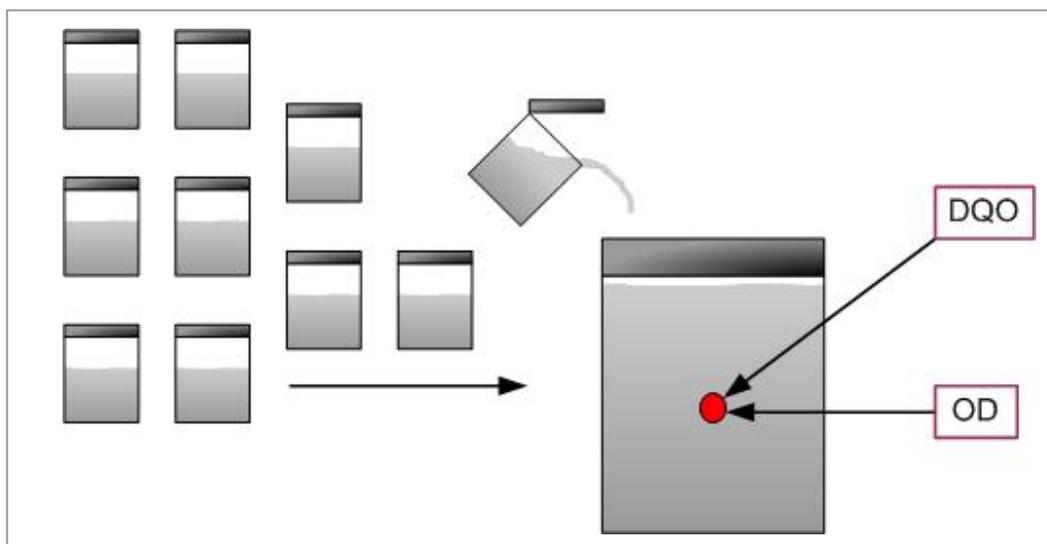


Figura 25.- Muestras Compuestas.



3.4.3.7 ANÁLISIS EN TERRENO

En esta etapa final se realizan nuevos análisis de DQO en dos canales de concreto, cuyas secciones son respectivamente 45cm de ancho para el canal que denominado “Canal Noreste”, con una pendiente aproximada de 0,005 y el segundo canal llamado “Canal Sur” el cual posee 30cm de ancho, pendiente de 0,01 y en los cuales se estudiarán 80mts de longitud realizando los muestreos cada 20m, con el objeto de observar el comportamiento de dicha variable. Esto para ambos canales. AL igual que en los casos anteriores se trabaja con niveles residuales de materia orgánica, estos ascienden de 127 a 240 mg/l para los distintos casos enunciados a continuación. Se pretende comprobar con estos resultados la influencia de la carga inicial de materia orgánica en la variación de la DQO, además de la importancia que tiene la intervención de una compuerta en el canal con la intención de oxigenar las aguas y el valor de la velocidad del flujo pasando de 0,31m/s a 0,50 m/s en el canal Noreste y para el canal Sur a una velocidad de 0,76m/s.

- El canal Noreste presenta los siguientes casos:
 - Caso 1: En este caso la carga de DQO inicial será de 127mg/l y velocidad del flujo de a agua residual de 0,31m/s.



- Canal 1.1: La DQO inicial es la misma que la del caso anterior variando su velocidad a 0,5 m/s. Al análisis de DQO se le agrega el de OD para todos los puntos estudiados.

- Caso 2: Para este caso la Carga aumenta a 240mg/l y la velocidad es de 0,31 m/s.

- Caso 2.1: Esta experiencia también posee una DQO inicial de 240mg/l y el flujo posee una velocidad de 0,5m/s. Se le realizan análisis de OD a todos los puntos estudiados.

- Caso 3: Al canal se le incorpora una placa con el objeto de simular una compuerta que se sitúa a los 39,5 m. desde la descarga y el agua residual poseerá una DQO inicial de 127 mg/l y su velocidad de 0,31m/s.

- Caso 3.1: Se trabaja con una DQO de 127 mg/l y las mismas características del canal anterior; sólo varía su velocidad a 0,5 m/s. El análisis de OD también se realiza en esta experiencia.



Figura 26.- Canal Terreno Noreste.



- El Canal Sur presenta los siguientes casos:
 - Caso 4: En este caso la carga de DQO inicial será de 127mg/l y velocidad del flujo de agua residual es de 0,76m/s.
 - Caso 4.1: Este escenario presenta una DQO inicial de 127mg/l y una compuerta a los 40m desde la descarga del agua residual con velocidad del flujo de 0,76m/s.
 - Caso 4.2: En este caso la carga de DQO inicial será de 240mg/l y velocidad del flujo de agua residual es de 0,76m/s.



CAPITULO 4

4. ANALISIS Y RESULTADOS

Todos los resultados arrojados por los análisis de demanda química de oxígeno mencionados en este capítulo fueron entregados por ESSBIO S.A. (Laboratorio “La Mochita”). Las muestras de DQO fueron analizadas en el Laboratorio Aguas Nuevo Sur Maule y en el Laboratorio ESSBIO “La Mochita”. Los análisis de OD fueron realizados en el Instituto de Investigación Pesquera. Todos los resultados respaldados por los laboratorios anteriormente mencionados.

4.1 Situación en el Tanque de Mezcla

De acuerdo a los datos teóricos y a los correspondientes aportes de los componentes estudiados (ver tabla 3), el valor inicial de la DQO deseado para este proyecto es de 90mg/l sin embargo, y de acuerdo a la muestra tomada en el tanque de mezcla y su correspondiente análisis, este valor asciende a 108 mg/L. Es decir, existe una diferencia de 18 mg/L adicionales en las aguas residuales sintéticas elaboradas en el laboratorio. Este aumento se puede explicar por una aproximación a la décima superior en los miligramos de sacarosa (hay que recordar que una pequeña cantidad de sacarosa influye de forma importante en el valor de la DQO).



Los resultados de laboratorio serán presentados de acuerdo a la pendiente estudiada, es decir, primero se analizarán todos aquellos resultados que fueron originados de canales con pendiente de un 3% llamadas también “Etapa a”, luego los resultados entregados cuando se estudió la pendiente de 1% denominada “Etapa b”. Se continua con la etapa llamada “Etapa c”, la cual expresa los resultados de los análisis cuando a los diferentes sistemas con pendiente de un 3% se les añade un tramo sin pendiente, como se explicó anteriormente en la metodología. Para luego continuar con los resultados específicos de aquel canal que arroje mejores resultados y finalizar con los resultados para las experiencias en terreno.

4.2 Sistema de Canal con pendiente de un 3% (Etapa a).

Estos resultados son producto del lanzamiento de las aguas residuales por una pendiente de fondo del 3%; canal base: experiencia 1.a, canal con compuerta: experiencia 2.a, canal con caída hidráulica: experiencia 3.a. De acuerdo al primer análisis entregado en el laboratorio, se comparan los resultados respecto a una DQO inicial igual a 108 mg/L.

Los análisis entregados, arrojaron los siguientes resultados para las muestras tomadas al final del canal en cuestión:



- Experiencia 1.a: El resultado de DQO final para el canal base es de 88 mg/l. Se observa a través de este resultado una reducción del valor de campo de 20 mg/l. A priori se puede decir que es una reducción bastante optimista, pero debe recordarse que proviene de una muestra puntual, lo que trae consigo errores que pueden ser minimizados con estimadores insesgados como el promedio de varias muestras (ver figura 34).

- Experiencia 2.a: Para un canal con compuerta y de pendiente de fondo de 3%, se espera de acuerdo a la hipótesis planteada, que el valor de la DQO desde el inicio al final del tramo se vea reducido más que en la primera experiencia. Efectivamente es lo que se presencia, ya que desde una DQO inicial de 108 mg/l se encontró en el punto de muestreo un valor de 84 mg/l, es decir se produjo una reducción de 24 mg/l.

- Experiencia 3.a: Para el canal con cascada y con una pendiente del 3% (equivalente a 12cm de altura de la caída), la DQO que inicialmente tenía un valor de 108mg/l, queda reducida a 62 mg/l, valor que es muy alentador y el mejor de las dos experiencias anteriores con pendiente del 3%, ya que se redujo la DQO en 46 mg/l.



En la figura 27 se comparará gráficamente, de acuerdo a la sensibilidad por escenario, las reducciones porcentuales de la primera etapa de este estudio.

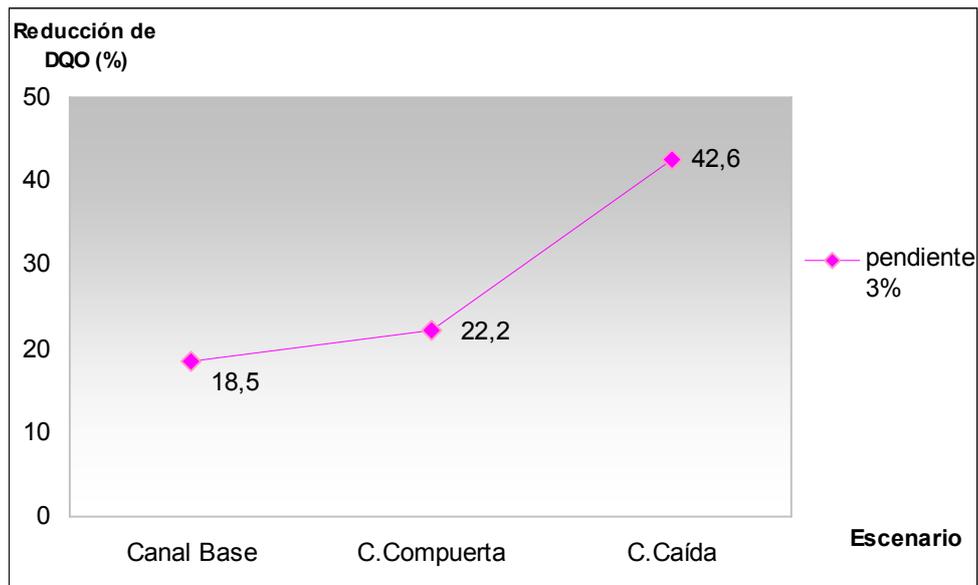


Figura 27.- Porcentaje de Reducción para pendiente media de 3%.

De acuerdo a la figura 27 se ve que para una misma pendiente los valores de la reducción de la DQO aumenta a medida que cambia el escenario, es decir, para un canal de sección constante la diferencia entre la DQO inicial y la DQO final es de 20 mg/l, aumenta esta variación en 4mg/l cuando se interviene este canal, obteniendo 24mg/l de reducción en la primera intervención (canal con compuerta) que representa un 3,7% más de disminución de la DQO presente en las aguas residuales.



Al comparar el canal base con el canal con caída hidráulica se aprecia una diferencia notable de 26 mg/l en la reducción de la demanda química de oxígeno, valores que revelarían que para esta pendiente el mejor escenario es la caída hidráulica.

El efecto esperado de los fenómenos inducidos (canal con compuerta y caída hidráulica) en el canal base dan buenos resultados en la disminución de la DQO de las aguas residuales. Con estos resultados se dan los primeros pasos para el objetivo del estudio y la comprobación de la hipótesis.



4.3 Sistema de canal con pendiente de un 1% (Etapa b).

Esta corresponde al cambio de pendiente para los distintos escenarios adquiriendo un valor de 1%, se denominan las experiencias como sigue: canal base: experiencia 1.b, canal con compuerta: experiencia 2.b, canal con caída: experiencia 3.b. Al igual que en la primera etapa las muestras fueron tomadas al final del canal en estudio y comparadas con una DQO inicial de 108 mg/L.

- Experiencia 1.b: Con esta disminución de pendiente de fondo del canal base el resultado alcanzado al final del canal es de 95 mg/l de DQO, es decir, la reducción es de 13 mg/l valor que a pesar de ser menor que con una pendiente del 3%, es muy satisfactorio para la autodepuración de las aguas, en el contexto de este estudio.

- Experiencia 2.b: Para este caso en donde se presencia un canal con compuerta, la DQO final es de 94 mg/l, y por ende se produjo una reducción de la DQO de 14 mg/l. Se ve como independiente del valor de la pendiente cuando existe este fenómeno la reducción de la DQO es favorable.



- Experiencia 3.b: Finalmente se estudia el canal con caída hidráulica que ahora posee una altura de 4cm (equivalente a la pendiente 1%), que entrega un resultado de 75 mg/l al final del tramo, reduciendo la DQO en 33 mg/l. Siendo el mayor aporte de esta etapa (etapa b) al igual que lo fue para la etapa a.

Se gráfica en la figura 28 la sensibilización por escenario para la pendiente del 1%, en términos de reducción porcentual.

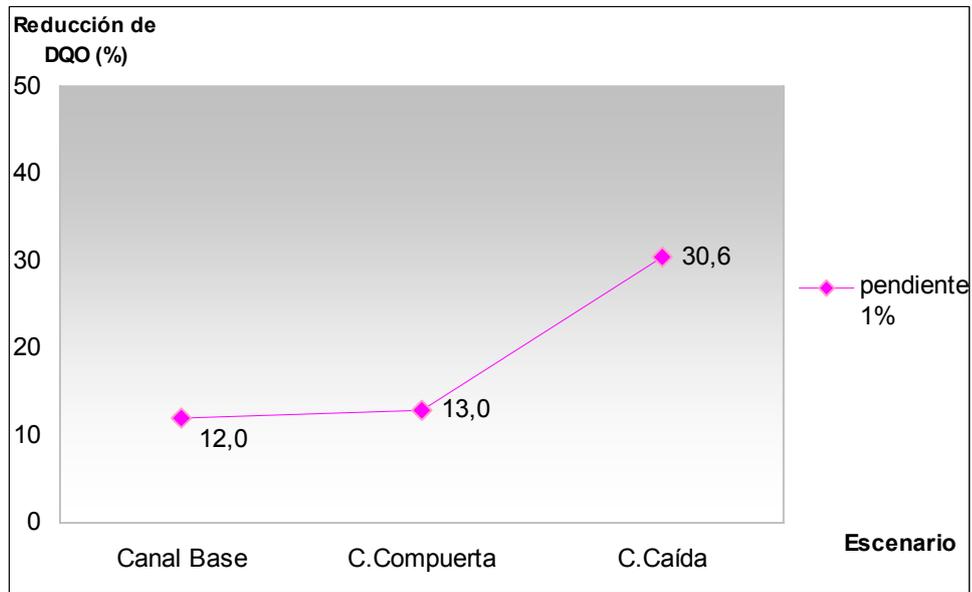


Figura 28.- Sensibilización por Escenario pendiente media de 1%.



La figura 28 otorga la misma tendencia que la figura 27 la cual asciende la reducción de la variable DQO al ir interviniendo el canal base con los fenómenos estudiados. Siendo la caída hidráulica el fenómeno que otorga mejores resultados para este estudio, alcanzando una diferencia con respecto al canal base de 20 mg/l, equivalente a un 17,6% favorable en la reducción de la variable analizada. Valor cercano al que se produce cuando los canales en comparación poseen pendiente media del 3%.

EL canal con compuerta se asemeja bastante a la reducción que entrega el canal base (ver figura 28.), con tan solo 1mg/l de diferencia, que representa un 0,9% más de reducción, por lo que intervenir el canal base con éste tipo de fenómeno no se justificaría para esta pendiente.

Al comparar las figuras 27 y 28 se aprecia la reducción porcentual de DQO cuando las aguas residuales pasan por distintos escenarios y diferentes pendientes. Se aprecia como a mayor pendiente va aumentando el porcentaje en la disminución de la demanda química de oxígeno y a la vez la intervención que sufre el canal base arroja mejores resultados en dicha variable.



4.4 Influencia en la DQO al Incorporar un Tramo de Canal al inicio de cada Sistema (Etapa C).

El objetivo de esta etapa fue estudiar el comportamiento de la demanda química de oxígeno cuando las aguas residuales pasan inicialmente por un tramo sin pendiente, pero con la misma sección que la del canal en cuestión. Se pretende con este tramo homogeneizar las aguas antes de que entren al canal en estudio y analizar los resultados para ver si ayuda en la oxidación de la materia orgánica.

Los diferentes canales fueron analizados para una pendiente del 3%. Al igual que las etapas anteriores las muestras fueron tomadas al final del tramo en cuestión y poseen una DQO inicial de 108mg/l. Los resultados son los siguientes:

- Experiencia 1.c: El resultado de DQO final para el canal base en esta etapa es de 88 mg/l. La reducción de DQO es exactamente igual que en la experiencia 1.a (20mg/l) la cual posee la misma pendiente, por lo que se puede deducir que el tramo anexado al canal base no es relevante para el objetivo que se busca.

- Experiencia 2.c: El valor final de la DQO es 88 mg/l, por lo que se ha producido una disminución de 20 mg/l. Este resultado muestra que el



tramo anexado no sólo no ayuda a la reducción de la DQO, sino que por el contrario dificulta el objetivo del estudio, puesto que se pasa de una reducción de 22,2% (sin tramo y con las mismas propiedades) a un 18,5% que otorga esta alternativa.

- Experiencia 3.c: Los resultados previos no indicaban una tendencia clara, sin embargo, se puede decir que la presencia de este tramo no ha sido un aporte adicional a la reducción de la DQO, ya que se obtuvo un porcentaje muy similar en la reducción de esta variable, pasando de un 42,6% sin tramo a un 41,7% con tramo.

En la figura 29 se grafica el antes y después del comportamiento de la variación DQO cuando al canal correspondiente (siempre con pendiente 3%), se le ha agregado un tramo para homogeneizar el flujo de agua residual.

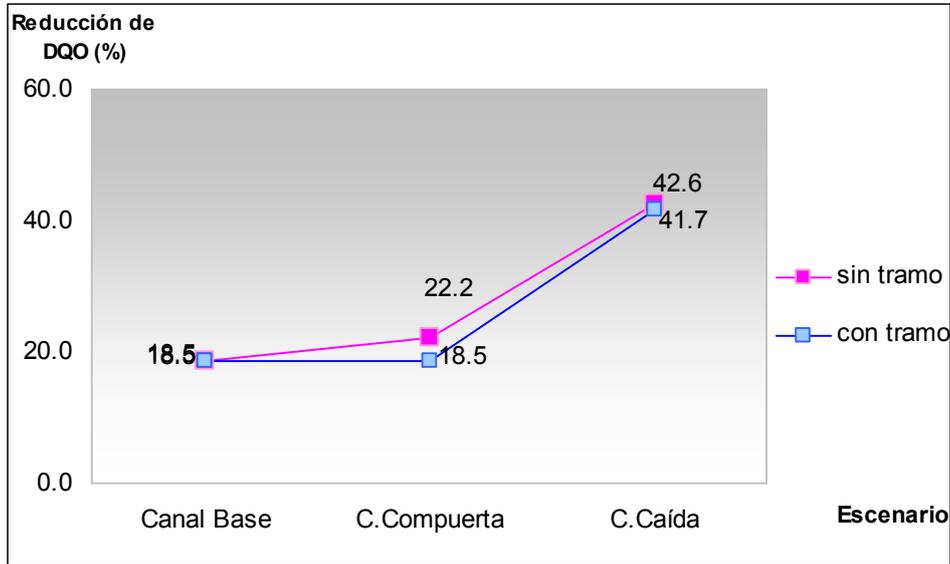


Figura 29.- Tramo anexado para pendiente media de 3 %.

Los resultados de la figura 29 para los escenarios son muy similares o inferiores cuando a éstos se les incorpora un tramo sin pendiente. La leve baja se explica por el efecto de turbulencia de las aguas, dado que el tramo anexado provoca una quietud en las aguas residuales en el momento de escurrir por el canal en estudio. Esta disminución implica que la transferencia de oxígeno hacia el curso de agua se vea disminuida en comparación con la experiencia en que el tramo sin pendiente no se incorpora, traduciéndose en una disminución de la reducción de DQO, para algunos escenarios.



4.5 Análisis de la Variación de DQO al Modificar la altura de la Caída Hidráulica.

Para poder establecer la relación que tiene la variación de la DQO v/s el valor de la altura de la caída, se escogió, de acuerdo a la metodología del estudio, el canal con presencia de caída y se analizó el efecto en la reducción de DQO que tendría para una altura de 8cm. Resultado que para la cascada arrojó 39 mg/l de reducción de la DQO. Siempre con una DQO inicial de 108mg/l.

Se grafica en la figura 30 la reducción de DQO v/s valor de la altura de la caída y estudia el coeficiente de correlación y determinación que mide la calidad de ajuste de la ecuación.

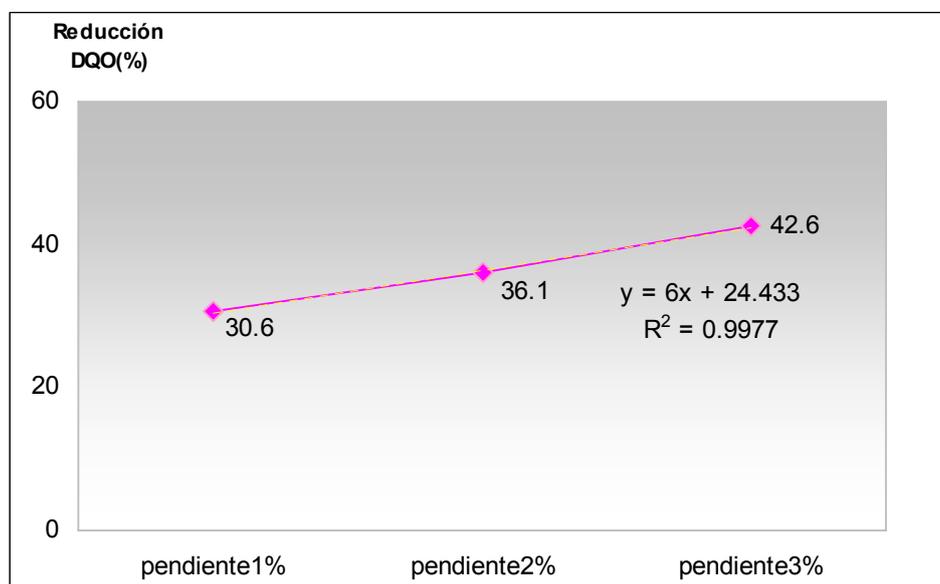


Figura 30.- Variación DQO v/s pendiente media en canal con cascada.



De acuerdo a la figura 30, se observa en definitiva una clara relación lineal entre la variación de la DQO y el valor de la pendiente media (Coeficiente de correlación de 99,88%, es decir existe un 99,88% de relación entre estas dos variables). Con respecto a la calidad de ajuste ambas variables se explican entre si en un 99,77%. La ecuación del modelo que dado por $ReducciónDQO(\%) = 6i + 24,433$.

Esta relación lineal afirma que a mayor pendiente mayor es la reducción de la DQO en las aguas residuales, mantiene una estrecha relación con lo enunciado en la teoría en que a mayor velocidad mayor turbulencias de las aguas y al encontrar flujos cada vez más turbulentos se origina una mayor transferencia de oxígeno a las aguas residuales en la interfase gas-líquido, originando una mayor cantidad de áreas de flujo en contacto con el aire influyendo de forma positiva en la oxidación de la materia orgánica en los distintos escenarios.



La figura 31, en términos del Número de Froude, corrobora lo dicho anteriormente “para flujos más turbulentos mayores son las reducción de la demanda química de oxígeno en las aguas residuales”. Esta tendencia se da para todos los escenarios estudiados.

Para el caso del canal con caída hidráulica la transferencia de oxígeno no está ligada a la velocidad del flujo previo a la caída, si no que a la distintas alturas que adquiere ésta y lo cual se ratifica plenamente con lo enunciado en la teoría (Hernández, 1992) en donde la captación de oxígeno para las caídas es directamente proporcional a la altura de ellas, lo se aprecia en la siguiente

$$\text{ecuación: } r = 1 + 0,11 * a * b * (1 + 0,046 * T) * \frac{10h}{3} .$$

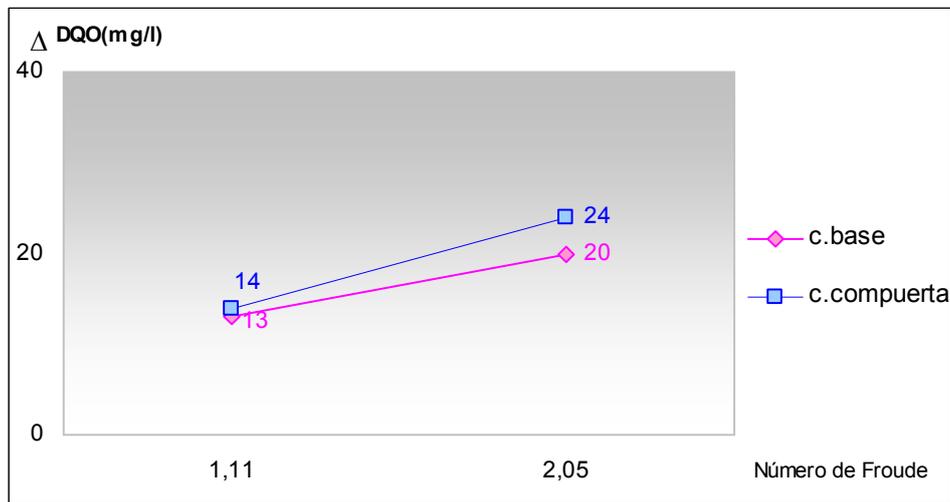


Figura 31.- Número de Froude v/s variación DQO.



4.6 Detalles de la variación de la DQO en la Caída Hidráulica:

Los puntos estudiados fueron a la salida del estanque alimentador, antes y después de la caída hidráulica y al final del tramo en cuestión. Como se puede apreciar en la figura 32.

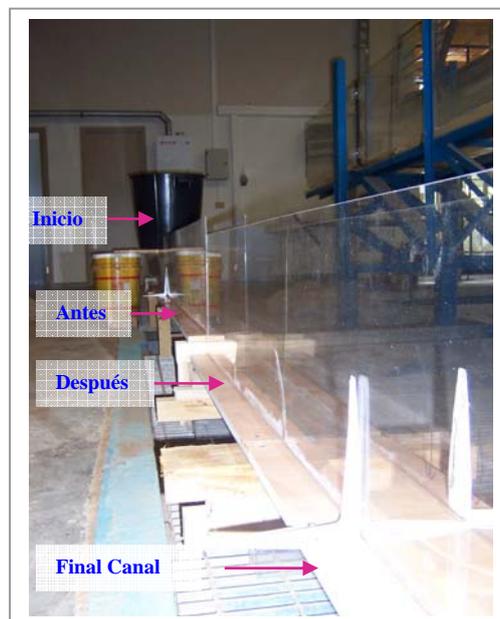


Figura 32.- Detalles Caída Hidráulica.

Y los resultados fueron los siguientes:

Punto de salida (0m):180 mg/l

Antes de la caída (2m):179 mg/l

Después de la caída (3m):159 mg/l

Final del tramo (4m): 139mg/l.

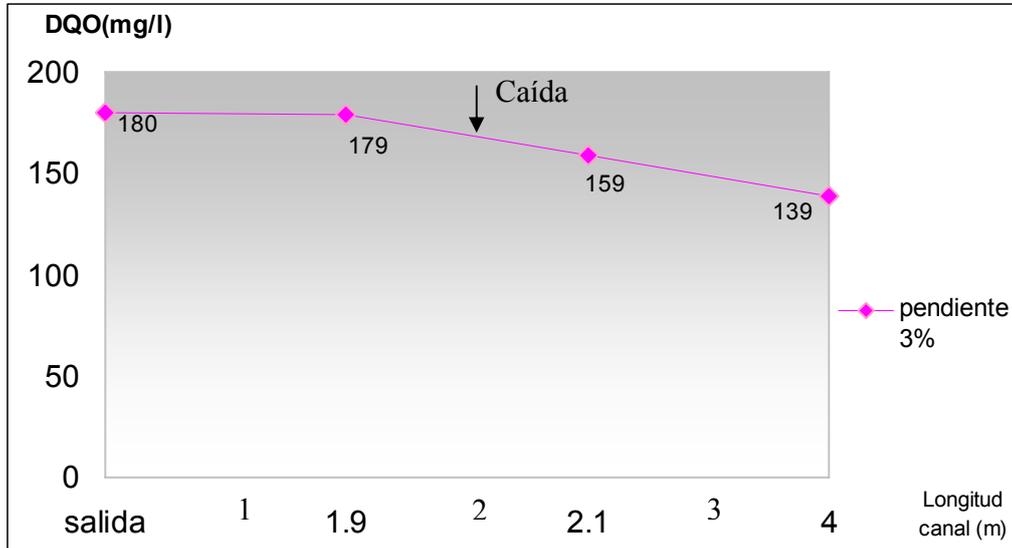


Figura 33.- Resultados de la DQO en Caída Hidráulica.

De acuerdo a la lectura y análisis de los resultados anteriores (ver fig. 33), se ve claramente que la mayor variación de la DQO se encuentra después de la caída hidráulica. Resultado que afirma que la presencia de este tipo de fenómeno hidráulico, es una ayuda para la disminución de la materia orgánica presente en aguas residuales con bajo contenido de materia orgánica y que su disminución se acentúa, luego de experimentado dicho fenómeno.



4.7 Análisis Muestras Compuestas

Hasta esta etapa se ha trabajado en base a muestras puntuales y para verificar la calidad de éstas se compararán, por medio de la figura 34, los resultados de análisis compuestos para todos los escenarios. Como se señaló en la metodología del estudio, se realizaron dichos análisis compuestos para la pendiente mayor, dado sus altas variaciones en el valor de la DQO.

Se espera con estos resultados poder definir si se cumplen las tendencias de los resultados anteriores y poder verificar la hipótesis de este estudio en conjunto con los análisis de oxígeno disuelto para estas mismas muestras de aguas residuales.

En el gráfico de la figura 34 se compararán resultados puntuales y resultados muestras compuestas:

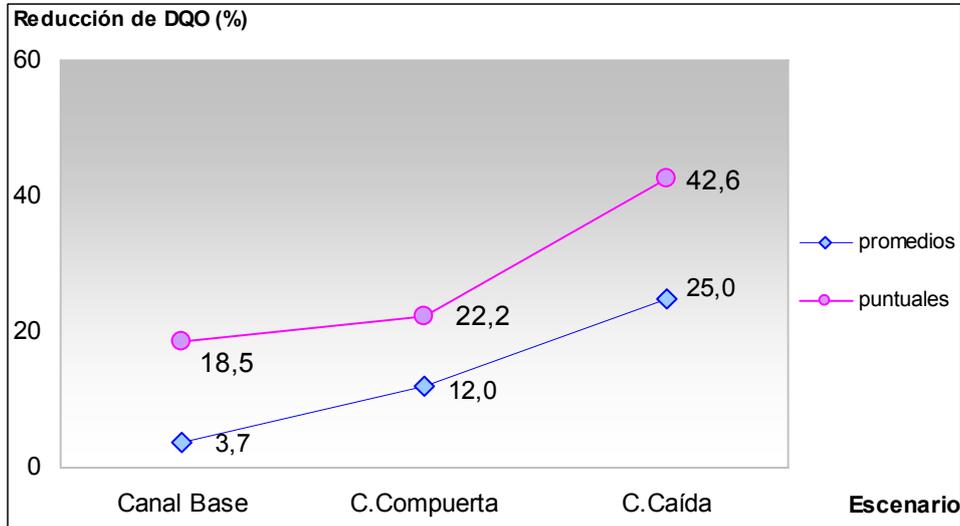


Figura 34.- Resultados promedios v/s puntuales

Los resultados obtenidos demuestran que los análisis promedios se diferencian considerablemente de los tomados en las muestras puntuales, pero independiente de esta diferencia la tendencia entre los escenarios estudiados no varía, arrojando como mejor alternativa para el objetivo del estudio la caída hidráulica y entregando un reducción adicional a la que entrega el canal base de 21,3%, similar a la ya obtenida en las muestras puntuales de 20,4%.



4.8 Análisis Oxígeno Disuelto:

Se aprecia de la figura 35 los resultados de la concentración de oxígeno disuelto que poseen las muestras compuestas tomadas en los respectivos canales con pendiente de un 3%, con un valor de oxígeno disuelto en el tanque de mezcla de 6,78 (mg/l).

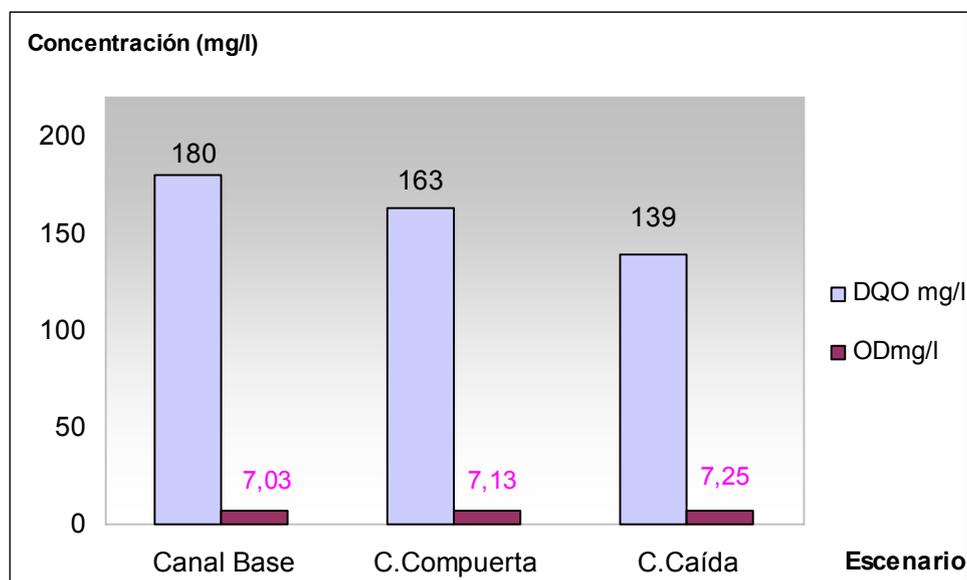


Figura 35. – Oxígeno disuelto para cada escenario.

A medida que la demanda química de oxígeno disminuye, la concentración de oxígeno disuelto aumenta discretamente dado que el requerimiento de oxígeno para la oxidación de la materia orgánica es menor después de ser transportadas las aguas por dichos canales. A su vez la figura 35 muestra mayores niveles de



oxígeno disuelto en los canales con compuerta y caída hidráulica, datos que permiten comprobar la hipótesis del estudio.

Por lo anterior se puede apreciar que la incorporación en el canal base de los fenómenos analizados en este estudio colaboran en la reducción de la demanda química de oxígeno de las aguas residuales estudiadas y se confirma la hipótesis usada en este estudio, la cual expresa que un “sistema de canal con compuerta y con caída hidráulica puede oxidar la materia orgánica presente gracias a la incorporación natural de oxígeno”, y en conjunto con la teoría estudiada en el capítulo 2.3.3 se verifica lo siguiente:

- Para un canal con compuerta la oxidación de la DQO aumenta en un 8,3% en comparación con el canal base, ambos con pendientes de un 3%, lo que explica que la incorporación de este fenómeno hidráulico favorece la incorporación de oxígeno a las aguas y con ello la oxidación de la materia orgánica de las aguas y el posterior proceso de autodepuración del cauce receptor.

- De acuerdo a lo planteado en la literatura el efecto de oxigenación en la caída hidráulica está directamente relacionado con su altura y una vez que las aguas pasen por ésta su nivel de oxígeno disuelto aumenta lo que permitirá aumentar la oxidación de la materia orgánica. Es el cumplimiento de esta teoría



la que entrega una reducción en laboratorio equivalente a un 21,3% de DQO en comparación con el canal base, haciendo de éste fenómeno el que otorga el mejor resultado para este estudio.

Comparado los resultados teóricos con los de laboratorio se ve según la fórmula

planteada por Stevenage (Hernández, 1992). $r = 1 + 0,11 * a * b * (1 + 0,046 * T) * \frac{10h}{3}$

= $r = 1,19008$ lo que indica que la altura utilizada aumenta el efecto de oxigenación. Ahora para que estos se de en laboratorio la concentración de oxígeno después de la caída hidráulica (C_A) debe aumentar en comparación con el valor de la concentración antes de ésta (C_B). La transferencia de oxígeno

existe entonces si $r > 1$ con $r = \frac{C_S - C_A}{C_S - C_B}$, es decir, que $C_A > C_B$ lo que de

acuerdo a los resultados de OD esto se ratifica (ver figura 35).



4.9 RESULTADOS EN TERRENO.

Los resultados fueron separados de acuerdo a la velocidad del flujo, con el fin de hacer una presentación aclaratoria del estudio.

La Tabla 4: Resultados de los análisis de DQO en los distintos puntos del canal Noreste para los casos 1,2 y 3 respectivamente los cuales poseen velocidad de 0,31 m/s.

	Canal DQOi 127mg/l	Canal DQOi 240mg/l	C. Compuerta 127mg/l
0	127	240	127
20	126,87	239,82	126,9
40	126,7	239,7	125
60	132	238	122
80	124	238	122
Reducción:	3	2	5

Tabla 4: DQO para los casos con velocidad de 0,31 m/s.

Los resultados del canal Noreste con velocidad de 0,5 m/s se presentan en la Tabla 5.

	Canal DQOi 127mg/l	Canal DQOi 240mg/l	C. Compuerta 127mg/l
0	127	240	127
20	125	238	125
40	123	237	122
60	121	235	118
80	120	234	116
Reducción:	7	6	11

Tabla 5: DQO para los casos con velocidad de 0,5 m/s.



Para los mismos casos anteriores correspondientes a los enunciados como caso 1.1, caso 2.1, caso 3.1, los resultados de oxígeno disuelto se presentan respectivamente en la Tabla 6, como sigue:

	Canal DQOi 127mg/l	Canal DQOi 240mg/l	C. Compuerta 127mg/l
0	7,93	6,33	7,95
20	7,97	6,46	7,98
40	8,02	6,67	8,14
60	8,19	6,72	8,44
80	8,26	6,87	8,67

Tabla 6: OD para los casos con velocidad de 0,5 m/s.

Para el canal Sur los resultados de DQO son los presentados en la tabla 7:

	Canal DQOi 127mg/l	Canal DQOi 240mg/l	C. Compuerta 127mg/l
0	127	240	127
20	124	237	123
40	119	234	118
60	117	231	113
80	114	229	108
Reducción:	13	11	19

Tabla 7: OD para los casos con velocidad de 0,76 m/s.

Los análisis de los distintos casos se presentan continuación.



■ Caso 1 y Caso 1.1

Las condiciones de los casos 1 y 1.1 son iguales exceptuando la velocidad del flujo de aguas residual presentando para el caso 1 una velocidad de 0,31m/s y el caso 1.1 una velocidad de 0,5 m/s.

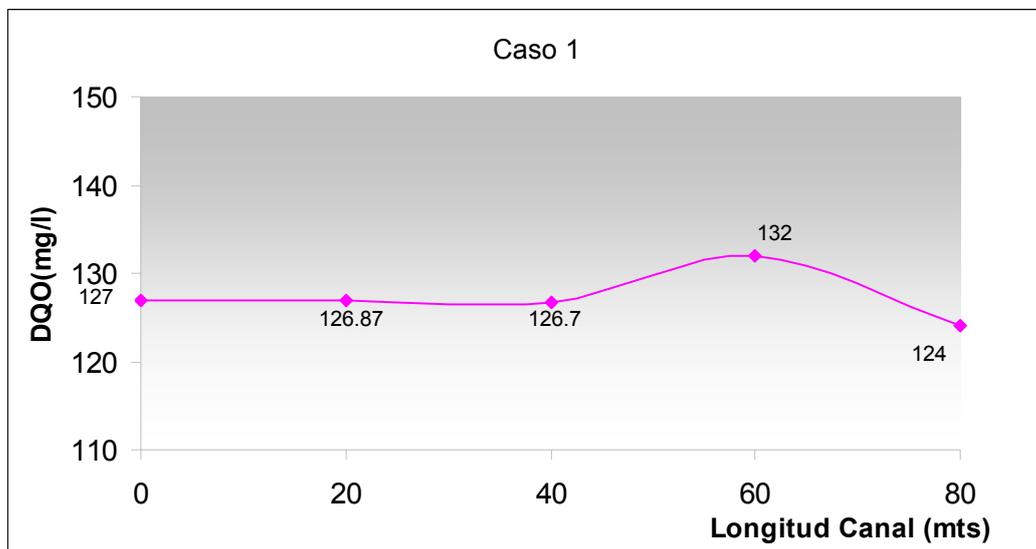


Figura 36.- DQO v/s Longitud del canal.

En este caso, con la velocidad del flujo es de 0.31m/s, la variación de la carga contaminante es muy baja en los primeros 40m de canal estudiado (ver fig. 36). Se entiende con este resultado que se produjo una mínima oxidación de la materia orgánica presente en el flujo de agua residual, resultado que se puede deber a la baja velocidad del flujo y por ende la poca oxigenación. Frente a cualquier



pronóstico de disminución de la DQO a lo largo del canal, se presenta en el punto que se encuentra a los 60m un alza de dicha variable en 5mg/l. Sin embargo, y a pesar de la discordancia del resultado, el último punto muestreado a los 80m, entrega una variación beneficiosa en la reducción de la materia orgánica presente en el agua residual de 3mg/l con respecto a la DQO inicial. Este resultado que conlleva a pensar que la oxidación de la materia orgánica se originó en los últimos metros del canal y que el aumento de la DQO a los 60m se puede deber a algún aporte extra de materia orgánica que no estaba considerada en el estudio.

Al aumentar la velocidad del flujo a 0.5m/s, se producen cambios en el valor de la DQO como se presencia en figura 37. Estos cambios son favorables para el estudio y corrobora que independiente del escenario de trabajo, la demanda química de oxígeno disminuye cuando un flujo es más turbulento y con ello aumenta el oxígeno disuelto presente en las aguas estudiadas (ver figura 38).

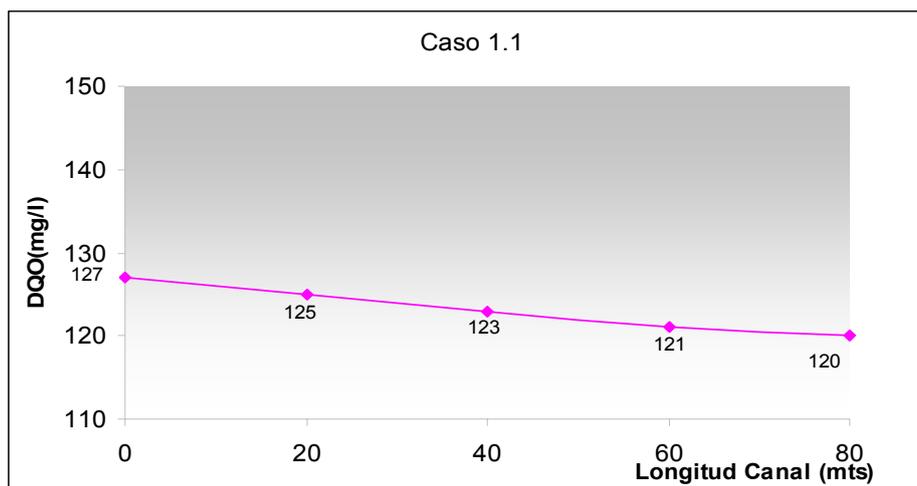


Figura 37.- DQO v/s Longitud del canal para velocidad de 0.5m/s.



Se aprecia del gráfico anterior que la reducción de la DQO para una velocidad de 0,5m/s es de 7mg/l, es decir, 4mg/l más que para el escenario que pose 0,31 m/s de velocidad, lo que define claramente que el factor de turbulencia de los flujos es relevante a la hora de remover la materia orgánica en las aguas residuales.

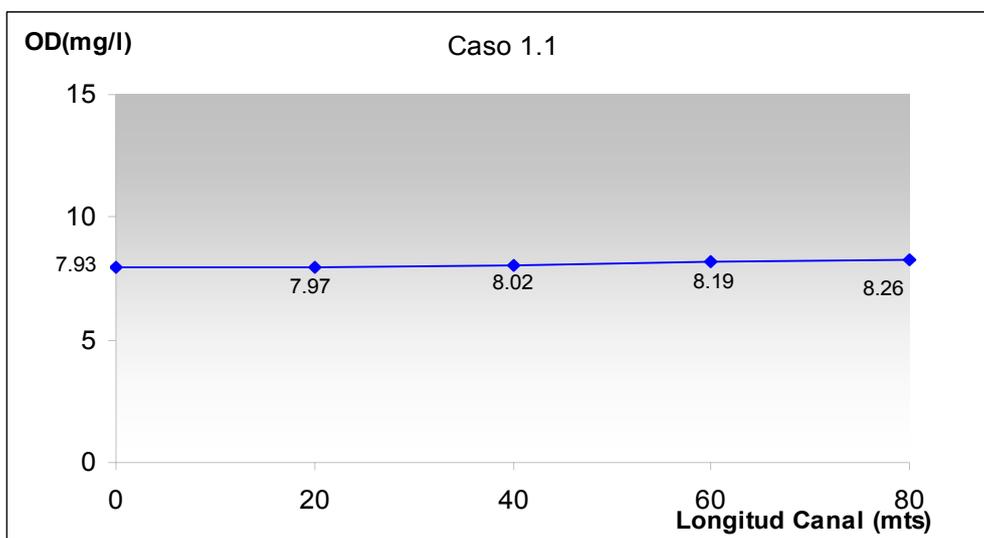


Figura 38.- Concentración de OD caso 1.1 con velocidad de 0,5m/s.

El aumento del oxígeno disuelto a lo largo del canal (ver fig. 38), concuerda con la teoría y con los resultados de DQO obtenidos en dichos puntos, dado que a medida que la carga contaminante disminuye el oxígeno disuelto en las aguas residuales aumenta ya que se requiere menos oxígeno para oxidar la materia orgánica presente en las aguas residuales.



■ Caso 2 y Caso 2.1

Estos casos se diferencian entre ellos por la velocidad del flujo, como se explica en la metodología, y se diferencia de los anteriores (caso 1 y caso 1.1) por la carga DQO inicial que asciende a un valor de 240mg/l. Los resultados del caso 2 se grafican en la figura 39.

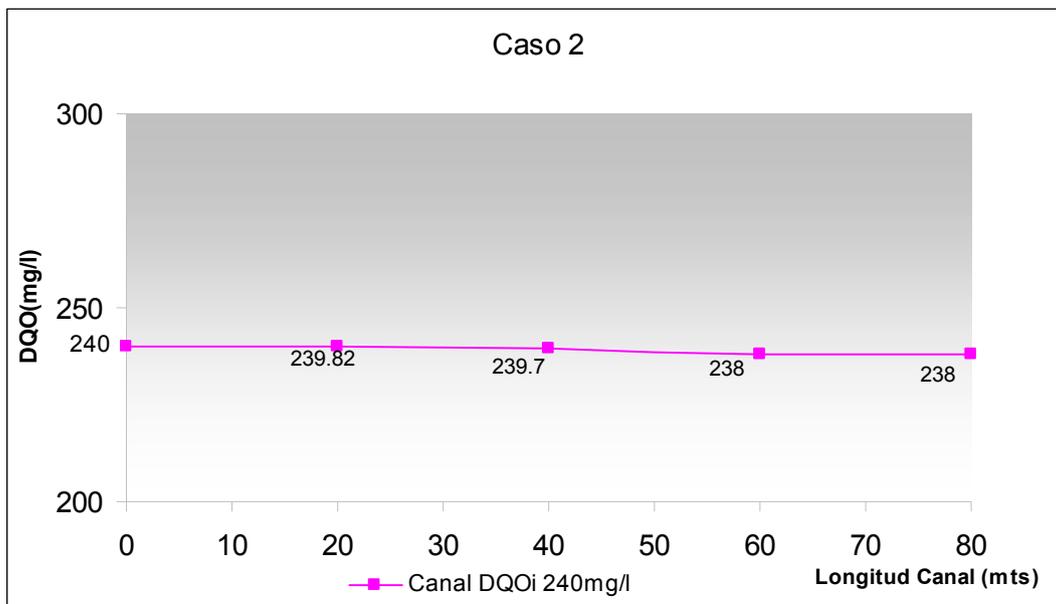


Figura 39.- DQO v/s Longitud del canal para caso 2.

Los resultados generados de estos análisis muestran una tendencia con respecto a la figura 37, en donde la reducción de la DQO se alcanza en los últimos metros del canal, resultados que se pueden deber a la oxigenación que se logra en el



punto más alejado de la descarga de las aguas, lo que concuerda con la teoría y en donde la ecuación del agotamiento de la DQO es un proceso de primer orden que alcanza sus niveles mínimos a medida que aumenta el recorrido desde la descarga (Metcalf and Eddy).

La misma tendencia que mostraban los resultados anteriores en donde a mayor velocidad, la reducción de la DQO aumenta como se aprecia en el caso 2.1 (ver figura 40).

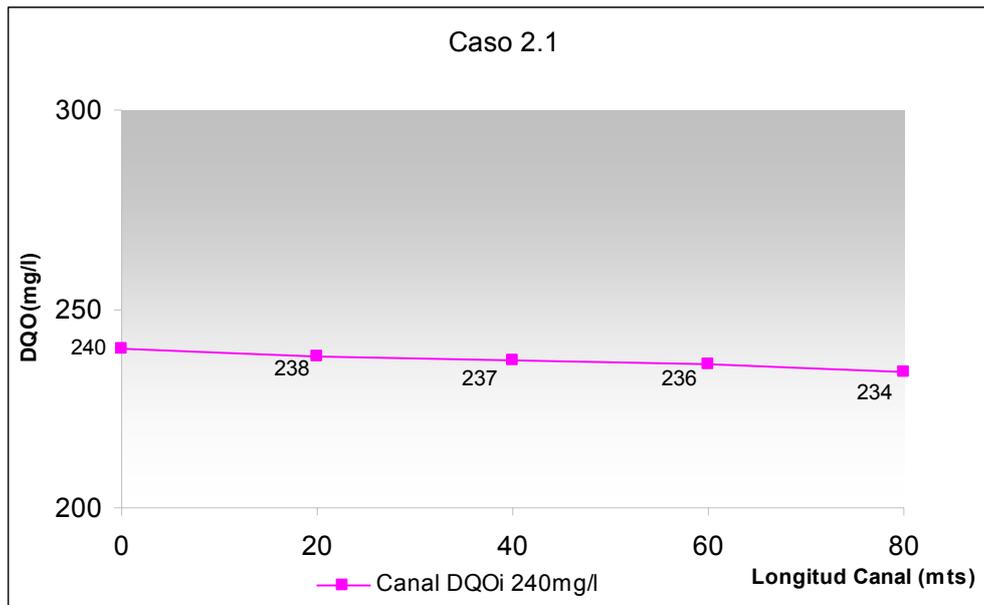


Figura 40.- DQO v/s Longitud del canal con velocidad 0,5m/s.

La variación en la reducción de la DQO no varía drásticamente con respecto al valor de la carga inicial de DQO, pero sí logra una tendencia a disminuir su valor al



final del tramo (ver figura 41 y 42). Ahora en términos porcentuales se puede decir que al doblar el valor de la carga contaminante inicial, con una velocidad de 0,31 m/s la reducción de la DQO disminuye en un 1,5% y para una velocidad de 0,5m/s la reducción DQO disminuye en un 3%, es decir, el aumentar la carga contaminante en la descarga hace que disminuya la reducción de la DQO a lo largo del canal. Esto se debe a que a mayor carga el requerimiento de oxígeno es mayor para remover dicha variable, dado que el déficit de oxígeno aumenta a una tasa que es proporcional a la demanda de oxígeno de la materia (Unda Opazo, 1998).

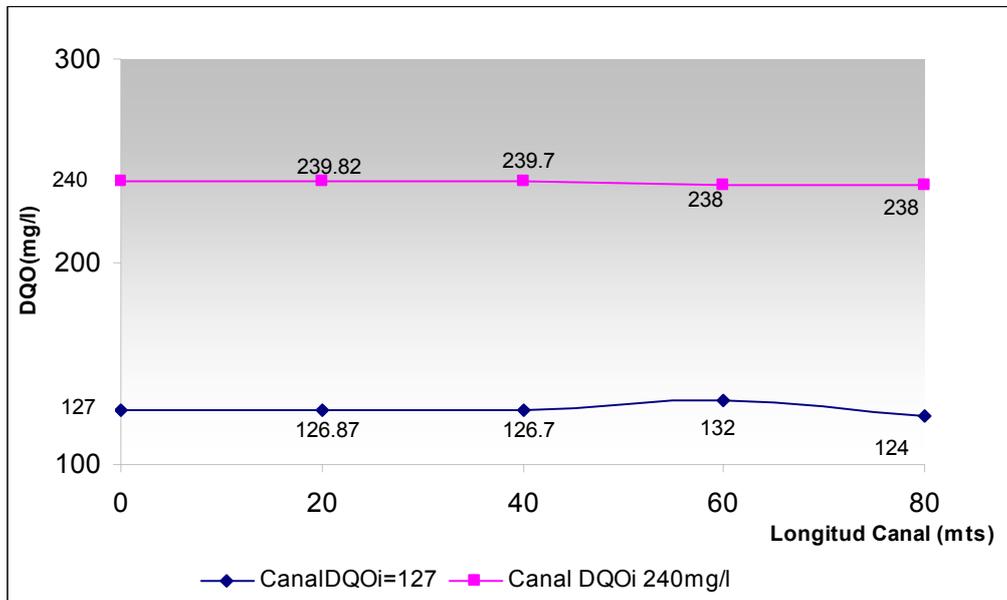


Figura 41.- Comparación de Cargas iniciales para una velocidad de 0,31m/s.

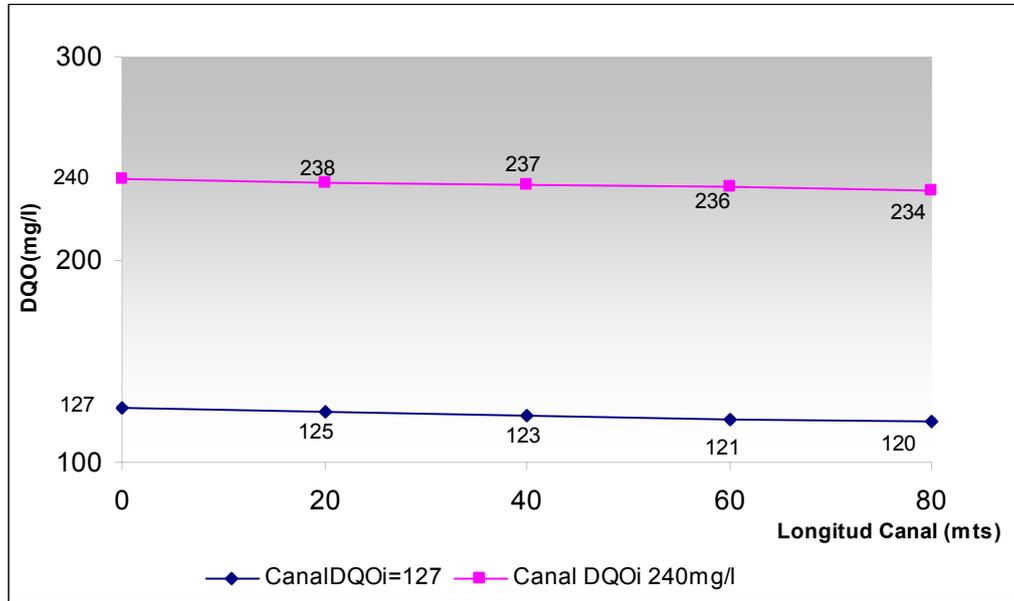


Figura 42.- Comparación de Cargas iniciales para una velocidad de 0,5m/s.

■ Caso 3 y Caso 3.1

Como se apreció en las experiencias realizadas en laboratorio, en que el aumento de la velocidad tomaba real importancia en un canal donde existe una compuerta que provoca cambios en el estado del flujo. Los casos 3 y 3.1 poseen una compuerta a los 39,5m desde el origen y se diferencian como los casos anteriores en que poseen diferentes velocidades.



La figura 43 muestra las variaciones sufridas por la DQO cuando el flujo presenta la menor velocidad estudiada (0.31m/s).

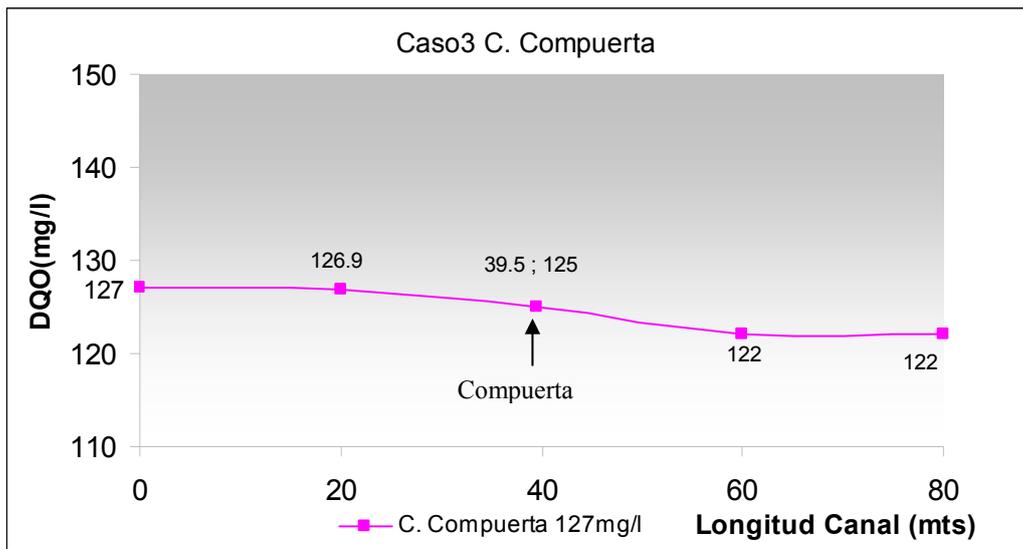


Figura 43: Canal con Compuerta y velocidad de 0,31m/s.

Existe una disminución en la DQO de un 3,94% entre el origen y el final del tramo de canal estudiado, como lo muestra la figura 43. Esta reducción de 5mg/l de carga contaminante es la más importante obtenida para una velocidad de 0.31m/s, lo que confirma lo realizado en laboratorio en donde la presencia de una compuerta es relevante a la hora de querer disminuir la DQO de las aguas residuales. La disminución de la DQO cuando el flujo posee una velocidad de 0,5m/s es de un 8,66%.

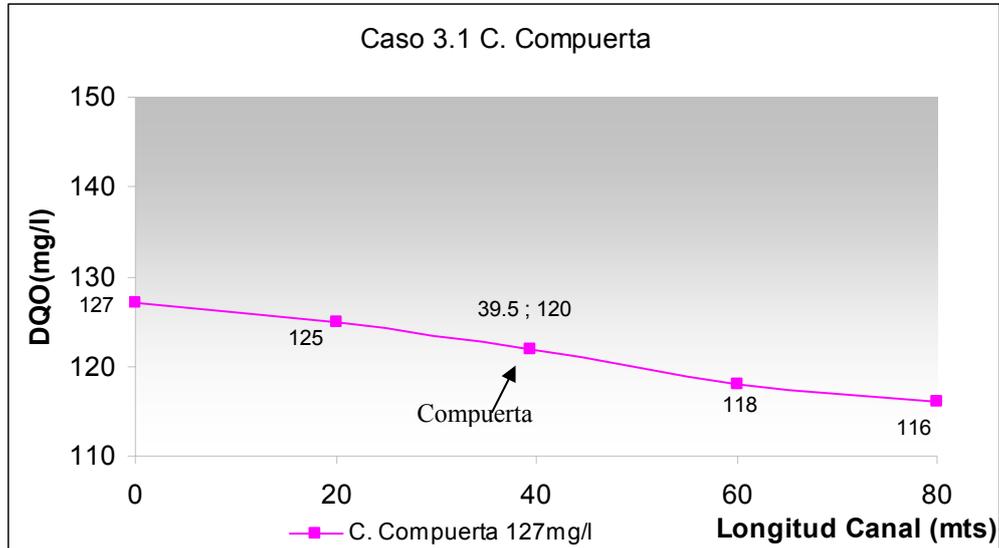


Figura 44: Canal con Compuerta y velocidad de 0,5m/s.

Para estos casos en donde se ubica una compuerta a los 39,5m desde la descarga de las aguas residuales, se generó una remoción importante de DQO en los metros previo a la compuerta. Estas disminuciones de la variable DQO se originaron ya que la compuerta origina cambios no sólo aguas abajo, si no que también inmediatamente antes de pasar por ella, esto debido a que el choque de las aguas con la compuerta genera burbujas reflejada también en un aumento del volumen del flujo y la clara turbulencia en el flujo lo que originaría una transferencia de oxígeno que beneficia el objetivo del estudio.

Por lo anterior el aumento de oxígeno disuelto en las aguas residuales también se ve beneficiado, aumentando su presencia a lo largo del canal.

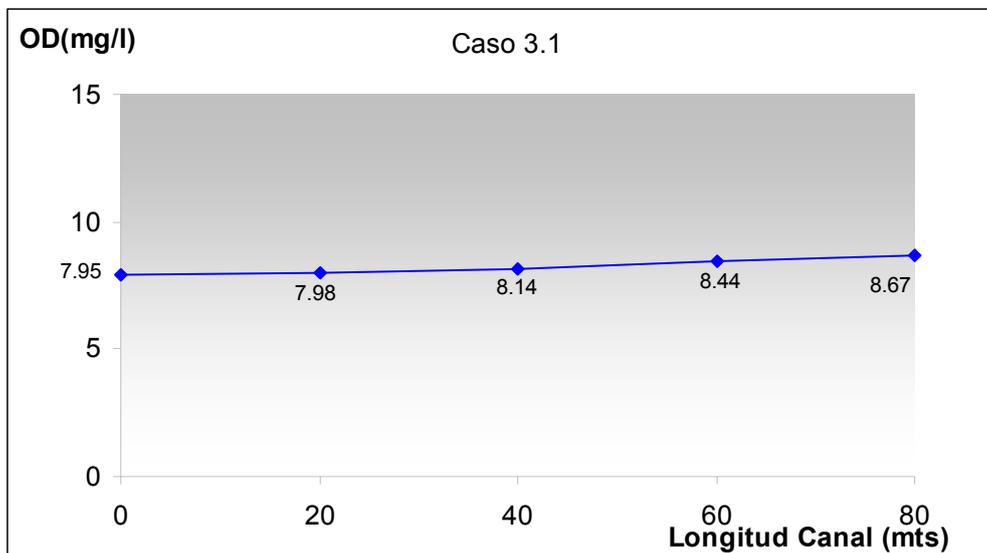


Figura 45.- OD caso 1.1 con velocidad de 0,5m/s.

Ahora el que haya aumentado el porcentaje de reducción de la DQO mucho más que en los otros casos, al aumentar la velocidad, se atribuye a que la fuerza con que llegan las aguas residuales a la compuerta influyen en el estado del flujo en dicho punto, provocando una mayor presencia de oxígeno disuelto en las cercanías a la compuerta. En los siguientes metros abajo existe una nueva reducción de la materia orgánica también importante para el objetivo del estudio.

Se compara en los siguientes gráficos los resultados originados al incorporar una compuerta, tanto para velocidad de 0,31m/s como para una velocidad de 0,5m/s, con aquellos en que esta no estaba presente.

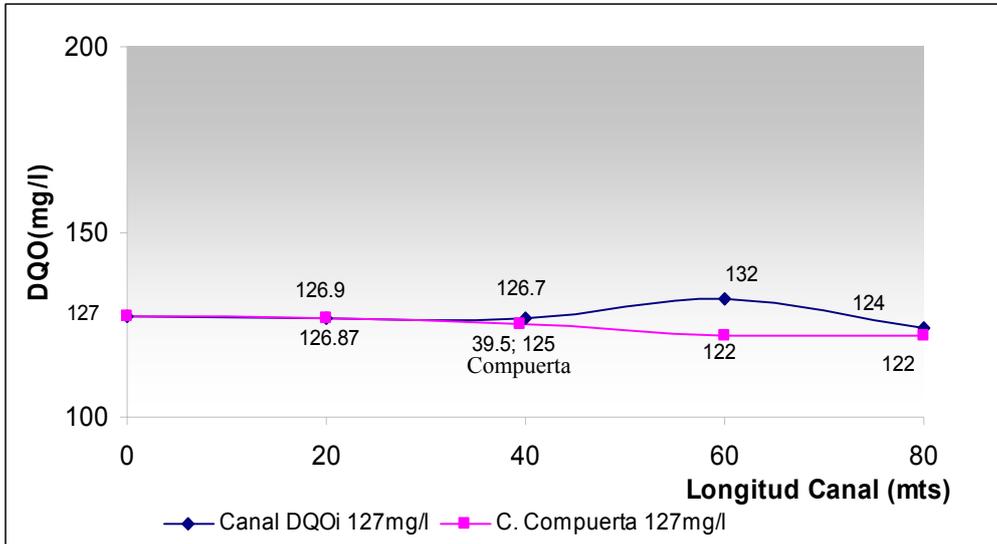


Figura 46.- Canal v/s Canal con Compuerta y velocidad de 0,31m/s.

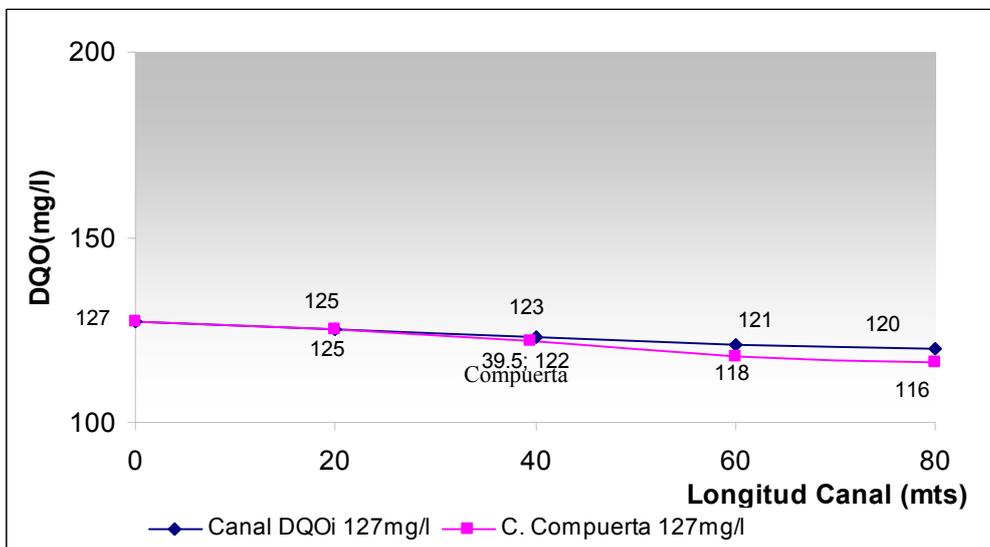


Figura 47.- Canal v/s Canal con Compuerta y velocidad de 0,5m/s.



Las variaciones de demanda química de oxígeno hasta el momento han sido bastantes moderadas, apreciándose variaciones mínimas que se podrían estimar como errores típicos de un análisis de DQO, comparando siempre con los resultados obtenidos en laboratorio. Se espera que al aumentar la velocidad del flujo de agua residual los resultados se acerquen en parte a los ya obtenidos en las experiencias de laboratorio:

■ Caso 4 y Caso 4.1

Para confirmar que los resultados arrojados en laboratorio se pueden reproducir en terreno, se escogerá un canal con características similares a aquellas con las que se trabajó en laboratorio. En este contexto el canal Sur presenta pendiente del 1% y una velocidad de 0,76 m/s, datos que se asemejan en parte a algunas de las experiencias realizadas en este estudio.

Los resultados arrojados para este caso y trabajados de acuerdo a la metodología enunciada anteriormente son los siguientes:

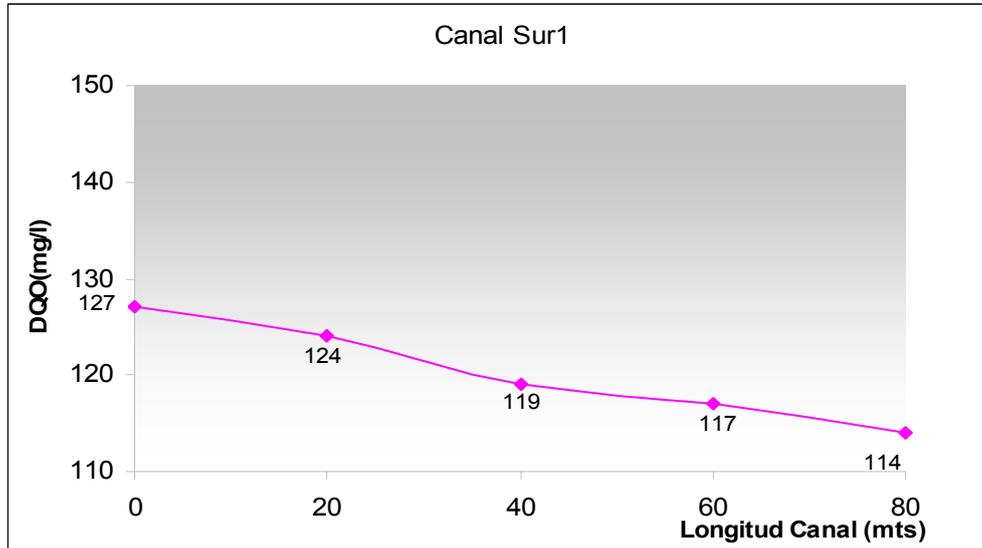


Figura 48.- DQO v/s Longitud del canal con velocidad 0,76m/s.

Se ve como la variación de la DQO aumenta con el aumento de la velocidad y más aún cuando el canal es intervenido con una compuerta (ver figura 49).

La semejanza de los resultados de terreno con respecto a los de laboratorio dan una clara señal de que la reducción de la materia orgánica en las aguas residuales es lograda a medida que el flujo presente mayor nivel de turbulencia, lo que permite llevar a cabo la transferencia del oxígeno atmosférico a las aguas en cuestión.

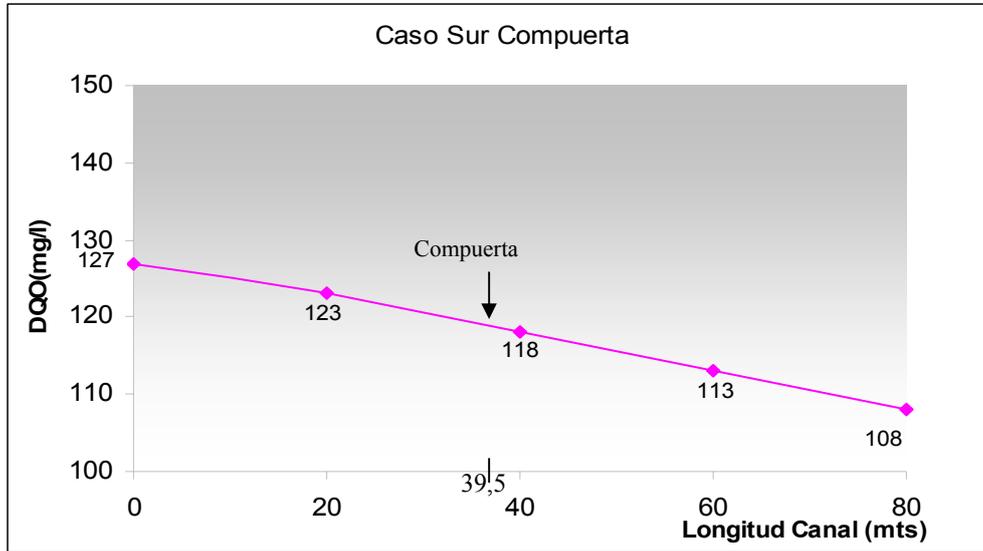


Figura 49.- Canal v/s Canal con Compuerta y velocidad de 0,76m/s.

El aumento de la carga contaminante en la descarga de agua residual mantiene la misma línea lograda en los análisis de terreno anteriores, lo que demuestra lo importante que es la precaución de verter aguas residuales de mala calidad. Ello que permite concluir que entre más altos los niveles de DQO presente en las aguas que serán vertidas a un cauce natural, mayor es la necesidad de intervenir el canal por el cual viajan dichas aguas, para así ayudar a la oxigenación y finalmente a mantener un equilibrio en el cauce receptor.

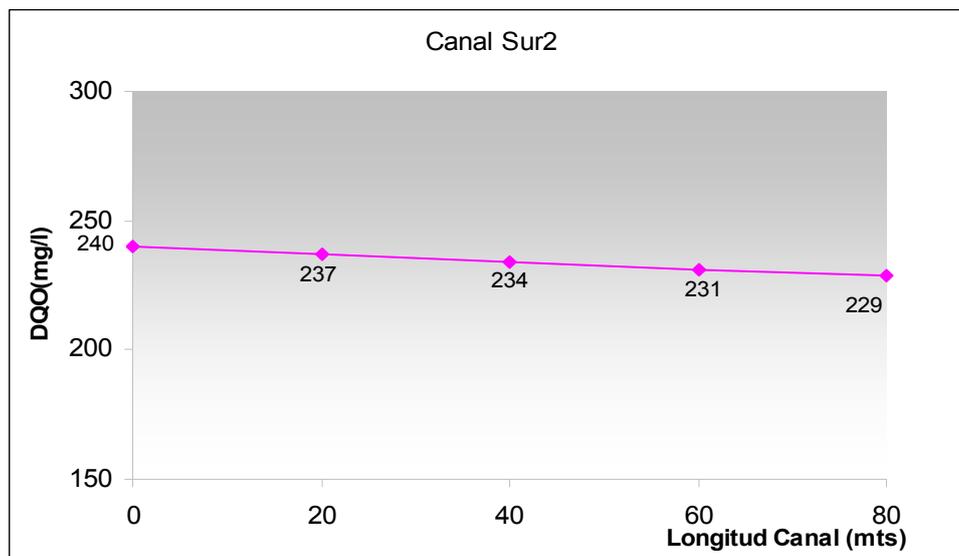


Figura 50.- DQO v/s Longitud del canal con velocidad 0,76m/s al aumentar la carga inicial.

Los resultados obtenidos en la figura 50 ratifican la hipótesis del estudio en que un sistema con compuerta y un flujo más turbulento ayuda en la reducción de la DQO de las aguas residuales. A pesar que las condiciones de trabajo no son exactamente las mismas, sí se logra la tendencia del estudio en laboratorio.



CAPITULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En base al estudio y escenario de trabajo, se concluye y recomienda lo siguiente:

5.1 CONCLUSIONES

■ En un canal con compuerta la reducción de la DQO aumenta en un 8,3% en comparación con el canal base, y en un 21,8% cuando existe una caída hidráulica, ambos con pendientes de un 3%.

■ La caída hidráulica es el fenómeno de los estudiados con mejores resultados en la reducción de la DQO, alcanzando para una altura de caída de 12cms. una reducción de un 25% según los análisis de muestras compuestas de este estudio.

■ Entre el valor de reducción de la DQO y el valor de la altura de la caída del canal, existe una relación de un 99,77% (coeficiente de correlación $r = 0,9988$), dicha relación es directamente proporcional y cualquier aumento de la altura de la caída se traducirá en una mayor reducción de la DQO.



■ El oxígeno disuelto en las aguas residuales es de 7,03 mg/l al final del canal base aumentando al incluir compuerta y caída hidráulica en 7,13 y 7,25mg/l respectivamente, resultados que corroboran la hipótesis de este estudio: “Un canal abierto que posea compuerta y caída hidráulica podrán ayudar a oxidar la materia orgánica de las aguas gracias a la incorporación natural de oxígeno”.

■ El incluir un tramo sin pendiente adicional al canal, con el fin de homogenizar las aguas, no otorga un aporte mayor al objetivo del estudio, puesto que con su presencia no se alcanzan mejores valores en la reducción de la DQO que sin él. Se ve por ejemplo, que los resultados obtenidos cuando existe compuerta y caída son menores al incorporar este tramo sin pendiente, logrando como mejor resultado la experiencia del canal base donde se igualan las reducciones de DQO (18,5%).

■ Dentro del canal con Cascada Hidráulica, la reducción más importante de la demanda química de oxígeno, se alcanza inmediatamente después de transcurrido el fenómeno hidráulico, equivalente a un 11,67%.



5.2 RECOMENDACIONES

■ Se recomienda el uso de cascadas hidráulicas en las descargas de las aguas residuales, puesto que el estudio ha demostrado que se produce una reducción de un 25% en la DQO; esto para los análisis de muestras compuestas. Por consiguiente este tipo de fenómeno ayuda o favorece a la descontaminación de las aguas residuales y posterior autodepuración del cuerpo receptor.

■ Dada la relación lineal entre la variación de la DQO (ΔDQO) y el valor de la altura de la caída, se recomienda realizar un estudio costo-beneficio, que determine un equilibrio operacional entre la construcción del canal y el beneficio que éste entregará. Realizar un estudio de factibilidad económica evitará el encarecimiento en la construcción del canal deseado.



BIBLIOGRAFIA

- Hernández Muñoz Aurelio. 1992. “Depuración de Aguas Residuales”, Segunda edición. España, Editorial Paraninfo.

- Ramalho S. Rubens. 1983. “Tratamiento de aguas Residuales”, Segunda edición. España, Editorial Reverté.

- Unda Opazo Francisco. 1998. “Ingeniería sanitaria aplicada a saneamiento y salud pública”. México, Editorial Limusa.

- Fair Gordon Maskew. 1968. “Ingeniería sanitaria y de aguas residuales”. México, Editorial Limusa

- Metcalf & Eddy. 1998. “Ingeniería de Aguas Residuales, tratamiento, vertido y reutilización”, Vol I y II. México, Editorial McGraw-Hill.

- Chow Ven Te. 1994. “Hidráulica de Canales Abiertos”. Bogotá, Editorial McGraw-Hill.



- Santana Oyarzo Luís A. 2004. “Hidráulica en contornos abiertos”, Apuntes de clases. Chile, Universidad del Bío-Bío.

- Domínguez Francisco Javier. 1974. “Hidráulica”. Chile, Editorial Universitaria.

- Streeter Víctor L. 1988. “Mecánica de Fluidos”. México, Editorial McGraw-Hill,

- Cisterna Osorio Pedro. 2004. “Tratamiento de Aguas Residuales”, Apuntes de Clases. Chile, Universidad del Bío Bío.

- Chavarría Montecinos Cristian. 2003. “Estudio de tratabilidad de lixiviados de rellenos sanitarios aplicando un tratamiento biológico”, Concepción, Universidad del Bío-Bío. Proyecto de Título de Ingeniería Civil.

- Arellano Orellana Rodrigo. 2005. “Evaluación de la proliferación de Bulking en sistemas de tratamientos de lodos activos”. Concepción, Universidad del Bío-Bío. Proyecto de Título de Ingeniería Civil.

- CONAMA, “Legislación Ambiental”, Ley 19.300 [en línea]
<http://www.conama.cl/rm/568/articles-30399_NOR_01_04_2.pdf>
<<http://www.conama.cl/portal/1255/propertyvalue-10314.html>>



- Superintendencia de Servicios Sanitarios “Residuos Líquidos y Control de Riles” [en línea] <<http://www.siss.cl>>

- De la Fuente, Rodrigo. Encargado Laboratorio “La Mochita”, entrevista.

- Rojas Opazo Romina. Encargada Depto. Estudios Ambientales, Instituto de Investigación Pesquera, Talcahuano, entrevista.

ANEXOS



ANEXOS

ANEXO 1: NORMAS DE EMISIÓN

DEFINICIONES BÁSICAS SEGÚN LA NORMA DE EMISIÓN:

- Fuente Emisora: Establecimiento que descarga residuos líquidos a uno o más cuerpos de agua receptor, como resultado de su proceso, actividad o servicio, con una carga contaminante media diaria o de valor característico superior en uno o más de los parámetros que la Norma indica (SISS).
- Descargas de residuos líquidos: Es la evacuación o vertimiento de residuos líquidos a un cuerpo de agua receptor, como resultado de un proceso, actividad o servicio de una fuente emisora.
- Cuerpos de agua receptor o cuerpo receptor: Es el curso o volumen de agua natural o artificial, marino o continental superficial, que recibe la descarga de residuos líquidos. No se comprenden en esta definición los cuerpos de agua artificiales que contengan, almacenen o traten relaves y/o aguas lluvias o desechos líquidos provenientes de un proceso industrial o minero (CONAMA).
- Residuos líquidos, aguas residuales o efluentes: Son aquellas aguas que se descargan desde una fuente emisora, a un cuerpo receptor.
- Norma de Emisión para la Regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a cuerpos con capacidad de dilución, a cuerpos de



agua marinos dentro de la zona de protección litoral y cuerpos de agua marinos fuera de la zona de protección litoral

Las fuentes emisoras podrán aprovechar la capacidad de dilución del cuerpo receptor, incrementando las concentraciones límites establecidas en la Tabla N° 1, de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$C_i = T_{1i} \times (1+d)$$

C_i =Límite máximo permitido para el contaminante i .

T_{1i} =Límite máximo permitido establecido en la Tabla 2.4.a para el contaminante i .

d =Tasa de dilución del efluente vertido.

Si C_i es superior a lo establecido en la Tabla N° 1, entonces el límite máximo permitido para el contaminante i será lo indicado en dicha Tabla.



Tabla 8: Límites máximos permitidos para la descarga de residuos líquidos a cuerpos de agua fluviales considerando la capacidad de dilución del receptor

CONTAMINANTE	UNIDAD	LIMITE MAXIMO PERMISIBLE
Aceites y Grasas	mg/L	50
Aluminio	mg/L	10
Arsénico	mg/L	1
Boro	mg/L	3
Cloruros	mg/L	2000
Coliformes Fecales o Termotolerantes	NMP/100 ml	1000
DBO ₅	mgO ₂ /L	300
Fósforo	mg/L	15
Manganeso	mg/L	3
Nitrógeno Total Kjeldahl	mg/L	75
PH	Unidad	6,0 -8,5
Poder Espumógeno	mm	7
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	300
Sulfatos	mg/L	2000
Sulfuros	mg/L	10
Temperatura	C°	40
Hidrocarburos Fijos	mg/L	50
Zinc	mg/L	20

■ Para las aguas Marinas tanto dentro como fuera de la zona de protección litoral, los límites máximos permitidos para la descarga de residuos líquidos se contemplan en la Tabla N° 2 y Tabla N° 3 respectivamente:



TABLA 9: Límites máximos permitidos para la descarga de residuos líquidos a cuerpos de agua marinos dentro de la zona de protección litoral

CONTAMINANTE	UNIDAD	LIMITE MAXIMO PERMISIBLE
Aceites y Grasas	mg/L	20
Aluminio	mg/L	1
Arsénico	mg/L	0,2
Cobre total	mg/L	1
Cromo Total	mg/L	2,5
Coliformes Fecales o Termotolerantes	NMP/100 ml	1000-70*
DBO ₅	mg/L	60
Fósforo	mg/L	5
Manganeso	mg/L	2
Nitrógeno Total Kjeldahl	mg/L	50
PH	Unidad	6,0 -8,5
SAAM	mg/L	10
Sólidos Sedimentables	mg/L	5
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	100
Sulfuros	mg/L	1
Temperatura	C°	30

* =En áreas aptas para la acuicultura y áreas de manejo y explotación de recursos bentónicos, no se deben sobrepasar los 70 NMP/100 ml.



TABLA 10: Límites máximos permitidos para la descarga de residuos líquidos a cuerpos de agua marinos fuera de la zona de protección litoral

CONTAMINANTE	UNIDAD	LIMITE MAXIMO PERMISIBLE	LIMITE MAXIMO PERMISIBLE A PARTIR DEL 10º AÑO DE VIGENCIA DEL PRESENTE DECRETO
Aceites y Grasas	mg/L	350	150
Sólidos Sedimentables	mg/L	20	20
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	300	300
Aluminio	mg/L	10	
Arsénico	mg/L	0,5	
Cobre total	mg/L	3	
Indice de Fenol	mg/L	1	
Cromo Total	mg/L	10	
Hidrocarburos Totales	mg/L	20	
Manganeso	mg/L	2	
Nitrógeno Total Kjeldahl	mg/L	50	
PH	Unidad	5,5-9,0	
SAAM	mg/L	15	
Sulfuros	mg/L	5	
Zinc	mg/L	5	

Fuente: CONAMA



■ Norma de Emisión para la Regulación de Contaminantes asociados a las Descargas de Residuos Industriales Líquidos a Sistemas de Alcantarillado.

La presente norma de emisión establece la cantidad máxima de contaminante permitida para los residuos industriales líquidos, descargados por los establecimientos industriales en los servicios públicos de recolección de aguas servidas de tipo separado o unitario.

Tabla 11: Límites máximos permitidos para descargas de efluentes que se efectúen a redes de alcantarillado que no cuenten con plantas de tratamiento de aguas servidas.

PARÁMETROS	UNIDAD	EXPRESIÓN	LIMITE MÁXIMO PERMITIDO
Aceites y grasas	mg/L	A y G	150
Aluminio	mg/L	Al	10
Arsénico	mg/L	As	0,5
Boro	mg/L	B	4 ⁽¹⁾
Cadmio	mg/L	Cd	0,5
Cianuro	mg/L	CN ⁻	1
Cobre	mg/L	Cu	3
Cromo hexavalente	mg/L	Cr ⁺⁶	0,5
Cromo total	mg/L	Cr	10
Hidrocarburos totales	mg/L	HC	20
Manganeso	mg/L	Mn	4
Mercurio	mg/L	Hg	0,02
Níquel	mg/L	Ni	4
pH	Unidad	pH	5,5 - 9,0
Plomo	mg/L	Pb	1
Poder espumógeno	mm	PE	7
Sólidos sedimentables	ml/L 1 h	S.D.	20
Sulfatos	mg/L	SO ₄ ⁻²	1.000 ⁽²⁾



PARÁMETROS	UNIDAD	EXPRESIÓN	LIMITE MÁXIMO PERMITIDO
Sulfuros	mg/L	S ⁻²	5
Temperatura	°C	T°	35
Zinc	mg/L	Zn	5
DBO ₅	mg/L	DBO ₅	⁽³⁾
Fósforo	mg/L	P	10 - 45 ⁽⁴⁾
Nitrógeno amoniacal	mg/L	NH ₄ ⁺	80
Sólidos suspendidos totales	mg/L	S.S.	300 ⁽⁵⁾

Tabla 12: Límites máximos permitidos para descargas de efluentes que se efectúan a redes de alcantarillado que cuenten con plantas de tratamiento de aguas servidas.

PARÁMETROS	UNIDAD	EXPRESIÓN	LIMITE MÁXIMO PERMITIDO
Aceites y grasas	mg/L	A y G	150
Aluminio	mg/L	Al	10
Arsénico	mg/L	As	0,5
Boro	mg/L	B	4 ⁽¹⁾
Cadmio	mg/L	Cd	0,5
Cianuro	mg/L	CN ⁻	1
Cobre	mg/L	Cu	3
Cromo hexavalente	mg/L	Cr ⁺⁶	0,5
Cromo total	mg/L	Cr	10
Hidrocarburos totales	mg/L	HC	20
Manganeso	mg/L	Mn	4
Mercurio	mg/L	Hg	0,02
Níquel	mg/L	Ni	4
pH	Unidad	pH	5,5 - 9,0
Plomo	mg/L	Pb	1



PARÁMETROS	UNIDAD	EXPRESIÓN	LIMITE MÁXIMO PERMITIDO
Poder espumógeno	mm	PE	7
Sólidos sedimentables	ml/L 1 h	S.D.	20
Sulfatos	mg/L	SO ₄ ⁻²	1.000 ⁽²⁾
Sulfuros	mg/L	S ⁻²	5
Temperatura	°C	T°	35
Zinc	mg/L	Zn	5
DBO ₅	mg/L	DBO ₅	⁽³⁾
Fósforo	mg/L	P	10 - 15 ⁽⁴⁾
Nitrógeno amoniacal	mg/L	NH ₄ ⁺	80
Sólidos suspendidos totales	mg/L	S.S.	300

Fuente: CONAMA



ANEXO 2: Cálculos Generales

- Velocidad característica del flujo, m/s

$$V = \frac{R^{2/3} I^{0.5}}{\eta}$$

- Número de Froude:

$$Fr = \frac{V_t}{\sqrt{g * h_t}}$$

- Numero de Reynolds

$$Re = \frac{ul}{\nu} = \frac{uR}{\nu}$$

- **Canal Base:** Se presentan en la siguiente tabla los datos y resultados de acuerdo a la metodología de trabajo.

Pendiente 1	0.03
Pendiente 2	0.01
gravedad	9.8
viscosidad	1.003E-06
Altura escurrimiento1(m)	0.06
Altura escurrimiento2(m)	0.08
Area1	0.006
Area2	0.008
Perímetro Moj1	0.22
Perímetro Moj2	0.26
Radio Hidráulico 1	0.02727273
Radio Hidráulico 2	0.03076923
velocidad1(m/s)	1.56932541
velocidad2(m/s)	0.98192374
Reynold1	42671.7686
Reynold2	30122.6701
Froude1	1.95615199
Froude2	1.10896982

Tabla N° 6: Datos y Resultados para el Canal Base



➤ **Canal Compuerta:** Se presentan en la siguiente tabla los datos y resultados de acuerdo a la metodología de trabajo.

Pendiente 1	0.03
Pendiente 2	0.01
gravedad	9.8
viscosidad	0.000001003
Altura escurrimiento1(m)	0.062
Altura escurrimiento2(m)	0.085
Area1	0.0062
Area2	0.0085
Perímetro Moj1	0.224
Perímetro Moj2	0.27
Radio Hidráulico 1	0.027678571
Radio Hidráulico 2	0.031481481
velocidad1(m/s)	1.584855756
velocidad2(m/s)	0.997019015
Reynold1	43735.33723
Reynold2	31293.75438
Froude1	2.033203548
Froude2	1.092398111

Tabla N° 7: Datos y Resultados para el Canal Compuerta

Los datos obtenidos para este sistema fueron tomados en los primeros metros de canal.



➤ **Canal Caída:** Se presentan en la siguiente tabla los datos y resultados de acuerdo a la metodología de trabajo. Se aprecia que las velocidades son las mismas puesto que la velocidad de entrada del flujo a dicho canal no varía ya que este no posee pendiente solo varían la altura de la caída.

Altura Caída 1	0.12
Altura Caída 2	0.4
gravedad	9.8
viscosidad	1E-06
Altura escurrimiento1(m)	0.085
Altura escurrimiento2(m)	0.085
Area1	0.0085
Area2	0.0085
Perímetro Moj1	0.27
Perímetro Moj2	0.27
Radio Hidráulico 1	0.031481
Radio Hidráulico 2	0.031481
Ancho del Flujo	0.1
velocidad1(m/s)	0.75
velocidad2(m/s)	0.75
Reynold1	23540.49
Reynold2	23540.49
Froude1	0.821748
Froude2	0.821748

Tabla N° 8: Datos y Resultados para el Canal Caída



➤ **Canales Exteriores:** Se presentan en la siguiente tabla los datos y resultados de acuerdo a la características de los canales otorgándole el índice 1 a los resultados de las experiencias con volumen de agua residual de 80lts y a aquellas en que se usó 160 litros se les otorga el índice 2. El índice 3 esta denominado para los resultados originados del canal Sur.

Pendiente 1	0,005
Pendiente 2	0,005
Pendiente 3	0,01
gravedad	9,8
viscosidad	1,003E-06
Altura escurrimiento1(m)	0,017
Altura escurrimiento2(m)	0,037
Altura escurrimiento3(m)	0,045
Area1	0,00765
Area2	0,01665
Area3	0,0135
Perímetro Moj1	0,484
Perímetro Moj2	0,524
Perímetro Moj3	0,39
Radio Hidráulico 1	0,01580579
Radio Hidráulico 2	0,03177481
Radio Hidráulico 3	0,03461538
Ancho del Flujo	0,45
Ancho del Flujo 3	0,3
velocidad1(m/s)	0,31810294
velocidad2(m/s)	0,50669381
velocidad3(m/s)	0,75866737
Reynold1	5012,82822
Reynold2	16051,9433
Reynold3	26183,0137
Froude1	0,77934577
Froude2	0,84145656
Froude3	1,14243661

Tabla Nº 9: Datos y Resultados Canales Terreno.



ANEXO 3: Resultados Análisis de DQO

- Resultados Laboratorio: Los siguientes resultados fueron otorgados por el Laboratorio “La Mochita”, propiedad de ESSBIO S.A.

Etapa	Experiencia	DQO inicial (mg/l)	DQO final (mg/l)	Δ DQO (mg/l)
1	1.a	108	88	20
1	1.b	108	88	20
1	1.c	108	95	13
2	2.a	108	84	24
2	2.b	108	88	20
2	2.c	108	94	14
3	3.a	108	62	46
3	3.b	108	63	45
3	3.c	108	75	33
1*	1.a	108	104	4
2*	2.a	108	95	13
3*	3.a	108	81	27
Pendiente2%	Caída	108	69	39

Tabla 10.- Resultados Laboratorio.

- Análisis para caída hidráulica a lo largo de su longitud.

Sondeo	A	180
Sondeo	B	179
Sondeo	C	159
Sondeo	D	139

Tabla 11.- Resultados análisis caída hidráulica.

* Valores Promedios



- Resultados Terreno: Los resultados de DQO y OD (in situ) son presentados en las siguientes tablas:

	Canal DQOi 127mg/l	Canal DQOi 240mg/l	C. Compuerta 127mg/l
0	127	240	127
20	126.87	239.82	126.9
40	126.7	239.7	125
60	132	238	122
80	124	238	122

Tabla 12.- Resultados DQO canal noreste con veloc. 0.31m/s.

	Canal DQOi 127mg/l	Canal DQOi 240mg/l	C. Compuerta 127mg/l
0	127	240	127
20	125	238	125
40	123	237	122
60	121	235	118
80	120	234	116

Tabla 13.- Resultados DQO canal noreste con veloc. 0.5m/s.

	Canal DQOi 127mg/l	Canal DQOi 240mg/l	C. Compuerta 127mg/l
0	7.93	6.33	7.95
20	7.97	6.46	7.98
40	8.02	6.67	8.14
60	8.19	6.72	8.44
80	8.26	6.87	8.67

Tabla 14.- Resultados OD canal noreste con veloc. 0.5m/s.

	Canal DQOi 127mg/l	Canal DQOi 240mg/l	C. Compuerta 127mg/l
0	127	240	127
20	124	237	123
40	119	234	118
60	117	231	113
80	114	229	108

Tabla 15.- Resultados DQO canal Sur con veloc. 0.76m/s.