

**UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL**

Profesor Patrocinante: Dr. Pedro Cisterna Osorio



**“INCIDENCIA DE CONSIDERACIONES DE DISEÑO EN  
CÁMARAS DE RADIACIÓN SOLAR PARA LA  
ELIMINACIÓN DE COLIFORMES”**

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

**DANIELA CONSTANZA RUIZ DURÁN**

Concepción, marzo 2017

## NOMENCLATURA

### Unidades de medida

- $\text{mW}/\text{cm}^2$ : milivatio/ centímetro cuadrado
- $\mu\text{Ws}/\text{cm}^2$ : microvatio/ centímetro cuadrado
- nm: nanómetro
- nmp/100ml: Número más probable/100 milímetros
- L: litro

### Siglas

- TRH: Tiempo de residencia hidráulico

### Abreviaturas

- UV: ultravioleta

## INDICE GENERAL

<b>1. CAPITULO I: INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>5</b>
1.1. Justificación.....	6
1.2. Alcance de la investigación.....	6
1.3. Objetivo general .....	7
1.4. Objetivos específicos .....	7
<b>2. CAPITULO II: REVISIÓN BIBLIOGRAFICA .....</b>	<b>8</b>
2.1. Aguas residuales .....	8
2.1.1. Fuentes de aguas residuales.....	8
2.1.2. Clasificación de las aguas servidas.....	9
2.1.3. Caracterización de las aguas servidas.....	9
2.1.4. Indicadores de contaminación fecal en el control de calidad del agua.....	12
2.2. Tratamiento de aguas residuales.....	15
2.2.1. Fases de tratamiento de aguas residuales.....	15
2.2.2. Desinfección.....	16
2.2.3. Tecnologías convencionales de desinfección de aguas residuales .....	16
2.2.4. Tecnologías blandas de tratamiento de aguas residuales .....	17
2.3. Radiación solar .....	19
2.3.1. Radiación ultravioleta .....	20
2.3.2. Reflexión y refracción.....	21
<b>3. CAPITULO III: METODOLOGIA .....</b>	<b>24</b>
3.1. Selección del sitio .....	24
3.2. Materiales y equipos utilizados .....	24
3.2.1. Canales .....	24
3.2.2. Paneles reflectantes.....	25

3.2.3.	Medidor de intensidad de luz .....	26
3.2.4.	Medidor de radiación ultravioleta.....	26
3.3.	Procedimiento.....	26
3.3.1.	Escenario 1 (a) y (b).....	26
3.3.2.	Escenario 2 .....	30
3.3.3.	Escenario 3 .....	31
<b>4.</b>	<b>CAPITULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>32</b>
4.1.	Análisis de resultados Escenario 1 (a) y (b).....	32
4.1.1.	Análisis de geometría de la sección transversal del canal .....	33
4.1.2.	Análisis de la materialidad del canal .....	35
4.2.	Análisis de resultados Escenario 2 .....	37
4.2.1.	Análisis del volumen de agua dispuesto en el canal.....	37
4.2.2.	Análisis de paneles reflectantes.....	39
4.3.	Análisis de resultados Escenario 3 .....	40
<b>5.</b>	<b>CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>42</b>
<b>6.</b>	<b>CAPITULO VI: REFERENCIAS .....</b>	<b>43</b>
<b>7.</b>	<b>ANEXOS .....</b>	<b>45</b>
	ANEXO A. Construcción canales .....	46
	ANEXO B. Resultados análisis de reflexión de intensidad luminosa.....	49
	ANEXO C. Registro fotografico.....	51
	ANEXO D. Especificaciones técnicas medidor de radiación ultravioleta .....	55

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1:	Bacterias coliformes.....	13
Figura 2:	Esquema general de tratamiento de aguas servidas .....	15

Figura 3: Lagunas de maduración.....	18
Figura 4: Diagrama de reflexión y refracción. ....	22
Figura 5: Diagrama de reflexión especular y difusa. ....	22
Figura 6: Resultados análisis Escenario 1 (a).....	32
Figura 7: Resultados análisis Escenario 1 (b).....	33
Figura 8: Eficiencia en eliminación de coliformes Escenario 1 (a).....	34
Figura 9: Eficiencia en eliminación de coliformes Escenario 1 (b).....	34
Figura 10: Eficiencia en eliminación de coliformes Escenario 1 (a).....	36
Figura 11: Eficiencia en eliminación de coliformes Escenario 1 (b).....	36
Figura 12: Resultados análisis Escenario 2 .....	37
Figura 13: Eficiencia en eliminación de coliformes Escenario 2 .....	38
Figura 14: Eficiencia en eliminación de coliformes Escenario 2 .....	39
Figura 15: Resultados análisis Escenario 3 .....	40
Figura 16: Eficiencia en eliminación de coliformes Escenario 3 .....	40
Figura 17: Eficiencia en eliminación de coliformes .....	41

## **INDICE DE TABLAS**

Tabla 1: Principales Constituyentes de Interés en el Tratamiento de Aguas Residuales.....	11
Tabla 2: Parámetros Típicos Encontrados en las Aguas Servidas (sin tratar) en Zonas Urbanas y Rurales.....	12
Tabla 3: Bacterias Patógenas Excretadas en las Heces.....	14
Tabla 4: Características Relevantes de los Canales Según Análisis a Realizar. ....	27
Tabla 5: Características Relevantes de los Canales Según Análisis a Realizar. ....	30

# **INCIDENCIA DE CONSIDERACIONES DE DISEÑO EN CÁMARAS DE RADIACIÓN SOLAR PARA LA ELIMINACIÓN DE COLIFORMES**

Autor: Daniela Ruiz Durán

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío – Bío

Correo electrónico: [dcruizduran@gmail.com](mailto:dcruizduran@gmail.com)

Profesor Patrocinante: Pedro Cisterna Osorio

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío – Bío

Correo electrónico: [pcisterna@ubiobio.cl](mailto:pcisterna@ubiobio.cl)

## **RESUMEN**

El agua es esencial para la vida, debido a esto las infecciones transmitidas por la misma son una fuente altamente peligrosa por los riesgos de masificación. Bajo este contexto, es que se implementaron tecnologías de tratamiento de aguas residuales, en las cuales el proceso de desinfección contra los microorganismos patógenos se lleva a cabo, generalmente, por agentes químicos, como el cloro, método de bajo costo, pero ambientalmente incompatible y de comprobada toxicidad para el ser humano.

Este trabajo de investigación busca evaluar la incidencia de las características de diseño en la eliminación de coliformes por radiación ultravioleta de efluentes de aguas residuales tratadas, de manera de aportar con una alternativa económica y ambientalmente sostenible, y así, ampliar los usos de la reutilización de las aguas.

El método consiste en la utilización de canales con distintas características geométricas y distintos materiales reflectantes, además de concentradores, para aprovechar al máximo la radiación solar. La idea es encontrar las condiciones más eficientes en términos de eliminación de coliformes. Los

canales son llenados con agua residual y expuestos a la radiación solar, tomando muestras en distintos tiempos de residencia hidráulicos y monitoreando durante toda la experiencia la radiación ultravioleta.

Los resultados indican que tanto la geometría como la materialidad no son categóricos en la eliminación de coliformes, no así, el volumen de agua dispuesto en el canal. Por otro lado, los paneles reflectantes inciden de manera positiva, así también, la radiación UV juega un rol fundamental al momento de obtener mayores eficiencias.

Palabras claves: Radiación solar, Coliformes, Desinfección, radiación ultravioleta.

## **INCIDENCE OF DESIGN CONSIDERATIONS IN SOLAR RADIATION CAMERAS FOR THE ELIMINATION OF COLIFORMS**

Author: Daniela Ruiz Durán

Department of Civil and Environmental Engineering, University of Bio-Bio.

Email: [dacruzduan@gmail.com](mailto:dacruzduan@gmail.com)

Teacher Guide: Dr. Pedro Cisterna Osorio

Department of Civil and Environmental Engineering, University of Bio-Bio.

Email: [pcisterna@ubiobio.cl](mailto:pcisterna@ubiobio.cl)

### **ABSTRACT**

Water is essential for life, because of this the infections transmitted by it are a highly dangerous source due to the risks of overcrowding. In this context, it is that wastewater treatment technologies were implemented, in which the disinfection process against pathogenic microorganisms is generally carried out by chemical agents, such as chlorine. Method of low cost history, but environmentally incompatible and of proven toxicity for the human being.

This research aims to evaluate the incidence of design characteristics in the removal of ultraviolet radiation coliforms from treated wastewater effluents, in order to contribute with an economically and environmentally sustainable alternative, and thus, to extend the uses of water reuse.

The method consists in the use of channels with different geometric characteristics and different reflective materials, besides concentrators, to make the most of solar radiation. The idea is to find the most efficient conditions in terms of coliform removal. The channels are filled with residual water and exposed to solar radiation, taking samples at different hydraulic residence times and monitoring the whole experience the ultraviolet radiation.

The results indicate that both the geometry and the materiality do not present a great relevance in the elimination of coliforms, but not, the volume of water disposed in the channel. On the other hand, the installed reflective panels influence positively, so too, UV radiation plays a fundamental role in the moment of obtaining greater efficiencies.

Keywords: Solar radiation, Coliforms, disinfection, UV radiation.

## 1. CAPITULO I: INTRODUCCIÓN

El agua es indispensable para todas las formas de vida que habitan el planeta. A lo largo de los años, la demanda global de agua ha ido aumentando sin parar junto con el incremento de la población, inversamente a esto, los recursos de agua al alcance de todo el mundo disminuyen por el crecimiento de los procesos de contaminación.

Consumir agua en mal estado es una de las principales fuentes de infección y la causa de diversas enfermedades gastrointestinales, como el cólera. Los riesgos para la salud relacionados con el agua de consumo más comunes y extendidos son las enfermedades infecciosas ocasionadas por agentes patógenos (OMS, 2008). Estos agentes patógenos son biológicos, más que químicos, y las enfermedades que provocan la mayoría de las veces son contagiosas. Datos epidemiológicos sugieren que el saneamiento tiene al menos la misma eficacia en la prevención de las enfermedades que la mejora del abastecimiento del agua.

El proceso de inactivación de organismos patógenos en aguas residuales o desinfección de las aguas servidas se realiza usualmente a través de agentes químicos, como la adición de cloro. Método ampliamente aceptado por ser de bajo costo y presentar una eficacia de largo plazo contra los microorganismos patógenos, tales como los coliformes.

En búsqueda de tratamientos eficaces y ecológicos, es que Downs y Blunt descubrieron los efectos germicidas de la energía radiante del sol, en 1878. Sin embargo, no fue hasta 1910 que se realizaron los primeros intentos experimentales para usar radiación ultravioleta (radiación UV) como desinfectante del agua, en Marsella, Francia.

El presente proyecto de título busca desarrollar una alternativa simple, como lo es un canal, de bajo costo y ambientalmente sostenible, que permita la desinfección de aguas residuales, utilizando radiación UV proveniente del sol y técnicas de reflexión de la luz solar para la eliminación de coliformes.

### **1.1. Justificación**

El agua en suficiente cantidad y buena calidad es esencial para la vida. El análisis y tratamiento bacteriológico del agua residual juega un rol fundamental al momento de evitar enfermedades transmitidas por la misma. Usualmente, las grandes plantas de tratamiento atacan este problema a través de productos químicos, como lo es el cloro.

Utilizar cloro puede ser económico por el costo del insumo, pero por los riesgos de manipulación requiere equipo de seguridad y procedimientos sofisticados que sólo lo hacen práctico a gran escala.

Si se agrega cloro en pequeñas cantidades a un agua residual, el elemento reacciona con los compuestos reductores presentes. Si la cantidad de cloro es mayor formará, con la materia orgánica existente, compuestos organoclorados. Es así, que la generación de subproductos halogenados es una de sus principales limitantes. Los productos generados pueden ser diversos, pero los más importantes se conocen como trihalometanos, de comprobada toxicidad al ser humano. Debido a esto, y al creciente interés por proteger el medio ambiente es necesario realizar procesos de tratamiento que sean innovadores, por medio de energías renovables disponibles que den continuidad al efluente tratado por tecnologías de tratamiento no convencionales ya existentes, como es el caso de los humedales. Es así, que la radiación ultravioleta, junto a su efecto germicida, brinda una alternativa de depuración efectiva, sin generar subproductos de desinfección problemáticos.

### **1.2. Alcance de la investigación**

Esta investigación busca comprobar la incidencia de la radiación ultravioleta en la remoción de coliformes totales sobre un canal con propiedades reflectantes. Para ello se utilizan tres canales, dos de diferente geometría y el tercero de distinta materialidad. Los tres canales son alimentados con agua residual proveniente de la planta de tratamiento de aguas residuales ubicada en la comuna de Hualqui. Una vez vertida el agua sobre los canales se deja en reposo y expuesta a la luz solar, el control se realiza a través de 6 muestras por canal tomadas en diferente tiempo de residencia hidráulico (TRH), lo que permite comparar los rendimientos en la remoción de coliformes y

analizar la influencia de la geometría y la materialidad del canal. Cabe destacar que las condiciones de operación y toma de muestras son las mismas para todos tres canales.

Posteriormente, en la segunda experiencia, se utilizan dos canales de la misma geometría y materialidad, pero con distintos volúmenes de agua residual, agregando paneles reflectantes para aprovechar al máximo la reflexión de la luz solar. De esta experiencia se realiza un análisis comparativo para verificar si los paneles reflectantes aumentan la eficiencia en la remoción de coliformes, además del grado de incidencia de la altura de columna de agua.

Finalmente, se realiza un último ensayo, de manera de contar con más datos para establecer una posible relación entre la radiación ultravioleta y la eliminación de coliformes.

### **1.3. Objetivo general**

Evaluar la incidencia de las consideraciones de diseño en cámaras de radiación solar para la eliminación de coliformes de efluentes de aguas residuales tratadas.

### **1.4. Objetivos específicos**

A partir del objetivo general, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- a) Evaluar el impacto de la geometría, del canal, en la eficiencia de eliminación de coliformes.
- b) Evaluar el impacto de la materialidad, del canal, en la eficiencia de la eliminación de coliformes.
- c) Evaluar el impacto de la profundidad de la columna de agua en la eficiencia de eliminación de coliformes.
- d) Evaluar el impacto de paneles reflectantes en la eficiencia de eliminación de coliformes.
- e) Analizar la incidencia de la radiación solar en la eliminación de coliformes.

## 2. CAPITULO II: REVISIÓN BIBLIOGRAFICA

En este capítulo se presenta una revisión bibliográfica que comprende conceptos relacionados con las aguas residuales, sus características y su posterior tratamiento. Además, se exponen los indicadores de contaminación fecal en el control de calidad del agua, describiendo las características y propiedades del grupo coliformes. Así mismo, se presenta información relevante para la investigación acerca de la radiación ultravioleta.

### 2.1. Aguas residuales

Las aguas residuales, o aguas servidas, pueden ser definidas como la mezcla de los desechos líquidos provenientes de los hogares, las instituciones educativas y comerciales (aguas residuales domésticas), las fábricas e industrias (aguas residuales industriales) y las aguas de precipitaciones (lluvia) e infiltraciones, las que son juntadas y recogidas a través del sistema de alcantarillado (Báez, 2004).

#### 2.1.1. Fuentes de aguas residuales

Las cuatro fuentes fundamentales de aguas residuales son: aguas domesticas o urbanas, aguas residuales industriales, escorrentías de usos agrícolas, pluviales (Ramalho, 1998).

##### a) Aguas residuales domesticas

Son las aguas de origen principalmente residencial y otros usos similares (comercial, servicios, industria). Contiene principalmente desechos humanos, animales y otros de tipo casero.

##### b) Aguas residuales industriales.

Son aguas provenientes de los procesos industriales y la cantidad y composición de ella es bastante variable, dependiendo de la actividad productiva y de muchos otros factores (tecnología empleada, calidad de la materia prima, etc.).

##### c) Escorrentías de usos agrícolas

Son las aguas de origen principalmente agrario, provenientes de actividades agrícolas. Contienen principalmente desechos animales y materia orgánica biodegradable.

d) Aguas residuales pluviales.

Proviene de escurrimientos superficiales de aguas lluvias, tales como los techos, pavimentos, y otras superficies naturales del terreno.

Las aguas de precipitaciones e infiltraciones, presentan diferentes orígenes y contaminantes, por lo que las características de las aguas servidas variarán de una localidad a otra.

### *2.1.2. Clasificación de las aguas servidas*

Para Chile se considera que las aguas servidas de tipo rural se originan en asentamientos rurales, o en asentamientos humanos concentrados o dispersos que poseen 1.000 o menos habitantes, o entre 1.001 y 2.000 habitantes con menos del 50% de su población económicamente activa dedicada a actividades secundarias y/o terciarias.

### *2.1.3. Caracterización de las aguas servidas*

Las aguas servidas pueden ser caracterizadas basándose en sus constituyentes físicos, químicos y biológicos, permitiendo cuantificar los contaminantes presentes. En la tabla 1, se especifican los principales constituyentes de interés en el tratamiento de aguas residuales.

a) Características físicas

Dentro de las características físicas se encuentran:

- Sólidos sedimentables, suspendidos y disueltos. Aproximadamente el 60% de los sólidos son sedimentables y un 75% son de naturaleza orgánica (CENTA, 2007);
- Temperatura, la que puede determinar la solubilidad de diversos gases como el oxígeno y también ejercer efecto en las reacciones químicas y biológicas que pueden ocurrir (Metcalf & Eddy, 2003);

- Turbiedad y el color, debido a la materia en suspensión, organismos microscópicos y partículas que afectan el traspaso de la luz a través del agua, perturbando el desarrollo de organismos fotosintéticos (Ramalho, 1998); y
- El olor causado por los gases liberados durante el proceso de descomposición de la materia orgánica (Metcalf & Eddy, 2003).

#### b) Características químicas

Estas se agrupan en constituyentes inorgánicos y orgánicos. Dentro de los constituyentes inorgánicos se encuentra principalmente:

- El pH, que expresa una tendencia de acidez del agua y generalmente se sitúa en un rango neutro (6,5 - 8,5);
- Nutrientes, compuestos principalmente por nitrógeno y fósforo en sus diferentes formas, los cuales tienen un rol fundamental en la eutrofización de las aguas; y
- Los metales pesados como arsénico (As), cadmio (Cd), cromo (Cr), plomo (Pb), mercurio (Hg) y plata (Ag). Estos metales en altas cantidades pueden generar toxicidad en sistemas de tratamiento biológicos (Metcalf & Eddy, 2003).

Por otra parte, en los constituyentes orgánicos, la materia orgánica presente en las aguas servidas está constituida principalmente por proteínas (40 a 60 %), carbohidratos (25 a 50 %) y aceite y grasas (8 a 12 %) (Metcalf & Eddy, 2003).

Como parámetros de medida se emplea:

- Demanda Química de Oxígeno (DQO), que es definida como la masa de oxígeno necesaria para la completa oxidación de los componentes orgánicos del agua;
- Demanda Biológica de Oxígeno a los cinco días (DBO5), la cual está relacionada con la medición del oxígeno disuelto que consumen los microorganismos en el proceso de oxidación bioquímica de la materia orgánica durante 5 días; y
- Carbono Orgánico Total (COT), que mide pequeñas concentraciones de materia orgánica en el agua a través del carbono liberado como CO<sub>2</sub> (Von Sperling, 2007).

#### c) Características biológicas

Son de gran importancia, ya que se asocian principalmente a la presencia de microorganismos que pueden causar enfermedades a humanos y animales. Los microorganismos presentes en las aguas

servidas pueden ser bacterias, protozoos, virus, helmintos, rotíferos, algas, entre otros, siendo las bacterias, las que se encuentran en mayor abundancia (Oakley, 2005). En particular, los organismos bacterianos patógenos excretados por el hombre, se presentan en pequeñas cantidades y son difíciles de aislar y de identificar. Para ello se emplea el organismo coliforme (grupo de bacterias presentes en el suelo, plantas, humanos y animales) como indicador (Metcalf & Eddy, 2003).

Respecto a las concentraciones de los diversos constituyentes de las aguas servidas, se pueden establecer diferencias entre las de tipo urbano y las de tipo rural, debido a que presentan diferencias como la densidad poblacional, las diversas actividades que se ejercen, y los sistemas de recolección que se tienen en los núcleos humanos que las generan (Ramalho, 1998), ver tabla 2.

**Tabla 1: Principales Constituyentes de Interés en el Tratamiento de Aguas Residuales**

<b>Constituyentes</b>	<b>Razones de interés</b>
Sólidos suspendidos totales	Formación de depósitos de lodos y condiciones anaerobias
Compuestos orgánicos biodegradables	Agotamiento del oxígeno en fuentes naturales y desarrollo de condiciones sépticas
Constituyentes inorgánicas disueltas	Constituyentes inorgánicos adicionados por el uso. Aplicaciones en el reciclaje y en la reutilización de aguas residuales
Metales pesados	Constituyentes metálicos adicionados por el uso. Muchos metales se clasifican como polutantes de prioridad
Nutrientes	Crecimiento excesivo de la vida acuática indeseable, eutrofización, concentración de nitratos en agua para consumo
Patógenos	Transmisión de enfermedades
Polutantes orgánicos prioritarios	Sospechosos de ser carcinogénicos, mutagénicos, teratogénicos o de toxicidad aguda alta. Muchos polutantes prioritarios son resistentes a los métodos de tratamiento convencionales (conocidos como compuestos orgánicos refractarios)

*Fuente: Crites (2000).*

**Tabla 2: Parámetros Típicos Encontrados en las Aguas Servidas (sin tratar) en Zonas Urbanas y Rurales.**

Parámetro	Tipo de asentamiento	
	Rural	Urbano
DBO	110-800	200-500
DQO	210-1600	200-1600
NT	20-85	35-100
NH	12-50	6-60
NO	<1	<1
PT	2-23	6-30
PO	3-14	6-25
SST	120-450	100-500
SSV	95-315	-
Coliformes fecales	$1 \cdot 10^3$ - $1,8 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^6$ - $1 \cdot 10^{10}$

Fuente: Vera (2012).

Nota: Concentraciones expresadas en mg/L, excepto los coliformes fecales en NMP/100 ML, NMP: Numero Más Probable.

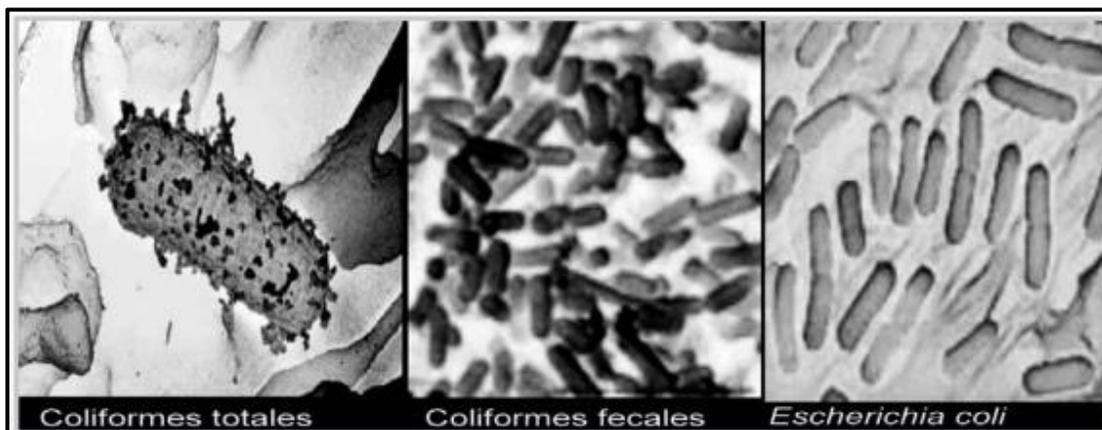
#### 2.1.4. Indicadores de contaminación fecal en el control de calidad del agua

##### a) Coliformes Totales

Este grupo incluye las bacterias aerobias y anaerobias facultativas, gran-negativas, no formadoras de esporas, de morfología bacilar y que fermentan la lactosa con producción de gas cuando son incubadas durante 48 h a 30-37°C, ver Figura 1.

Estos coliformes son eliminados a través de las heces humanas en números altos, pero no todos ellos son de origen fecal. Estos indicadores son muy útiles para determinar la calidad del agua. Ellos son menos sensibles que los virus y quistes de protozoos a factores de estrés ambientales y tratamientos de desinfección. En las plantas de tratamientos de aguas residuales los coliformes

totales son considerados uno de los mejores indicadores de la eficiencia de la planta de tratamiento (Benítez Rodas, 2013).



**Figura 1: Bacterias coliformes.**

*Fuente: Desinfección SODIS*

- Coliformes fecales

Los coliformes fecales o coliformes termotolerantes incluyen todos los coliformes que pueden fermentar la lactosa a 43,5-45,5°C y con capacidad de crecer en presencia de sales biliares. El grupo de los coliformes fecales comprende las bacterias como *E. coli* o *Klebsiella pneumoniae*. La presencia de coliformes fecales indica la presencia de materia fecal procedente de animales de sangre caliente. Sin embargo, los humanos y animales como fuente de contaminación no se pueden diferenciar. Algunos investigadores han sugerido el uso exclusivo de *E. coli* como un indicador de contaminación fecal, ya que puede ser fácilmente distinguido de otros miembros del grupo de coliformes fecales por indicadores enzimáticos como la ausencia de ureasa o la presencia de  $\beta$ -glucuronidasa. Los coliformes fecales muestran un patrón de supervivencia similar al de las bacterias patógenas, pero su utilidad como indicadores de contaminación por protozoos o virus son muy limitados, ya que son mucho menos resistentes que los quistes de protozoos y virus en los procesos de desinfección. Por tanto, la utilización de los coliformes como estándares de calidad de agua es poco fiable en ambientes acuáticos contaminados con virus y quistes de protozoos, que luego podrían volver a crecer en agua potable y aguas residuales bajo condiciones apropiadas (Benítez Rodas, 2013).

- Escherichia coli

Escherichia coli es un bacilo corto Gram negativo que se encuentra clasificado dentro de la familia Enterobacteriaceae (bacterias entéricas), existe como comensal en el intestino delgado de humanos y animales. Sin embargo, existen algunas cepas de E. coli patógenas que provocan enfermedades diarreicas. Estas se clasifican con base en las características que presentan sus factores de virulencia únicos, cada grupo provoca enfermedad mediante un mecanismo diferente, revisar Tabla 3. Se sabe que sus propiedades de adherencia a las células epiteliales de los intestinos grueso y delgado son codificadas por genes situados en plásmidos. De manera similar las toxinas son mediadas por plásmidos o fagos.

Este grupo de bacterias se encuentra constituido por las siguientes cepas: E. coli enterotoxigénica (ETEC), E. coli enteropatógena (EPEC), E. coli enterohemorrágica (EHEC), E. coli enteroinvasiva (EIEC), E. coli enteroagregativa (EAEC) y E. coli enteroadherente difusa (DAEC). Existen otras cepas que no han sido perfectamente caracterizadas; de las cepas anteriores, las 4 primeras están implicadas en intoxicaciones causadas por el consumo de agua y alimentos contaminados (Benítez Rodas, 2013).

**Tabla 3: Bacterias Patógenas Excretadas en las Heces**

Bacteria	Enfermedad	Receptor
Escherichia coli patogena	Diarrea	Hombre y animales
Salmonelas		
S. typhi	Fiebres tifoideas	Hombre
S. paratyphi	Fiebres paratifoideas	Hombre
Shigella	Disentería bacilar	Hombre
Vibrio Cholerae	Cólera	Hombre
Yersinia enterocolitica	Diarrea y septicemia	Hombre y animales

*Fuente: Seoáñez. Tratado de gestión del medio ambiente urbano*

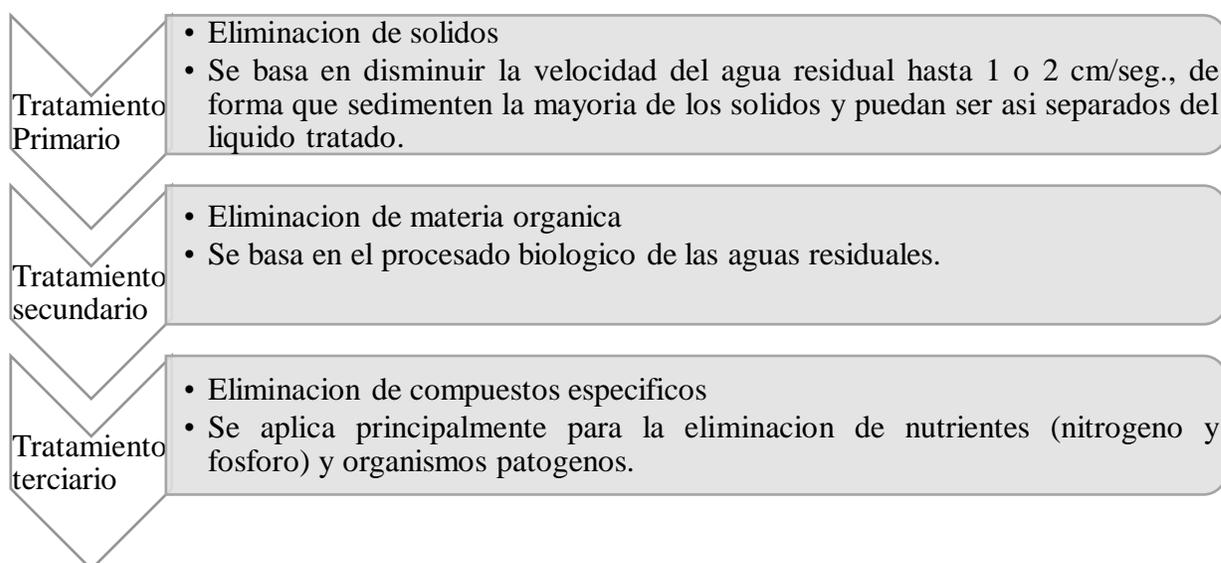
## 2.2. Tratamiento de aguas residuales

El objetivo del tratamiento de las aguas residuales es producir efluente reutilizable en el ambiente y un residuo sólido o fango (también llamado biosólido o lodo) convenientes para su disposición o reutilización.

Las tecnologías para tratar y gestionar las aguas residuales varían en función de las características del agua residual y de las normas de calidad exigidas para los efluentes que están en constante evolución junto a los imperativos medioambientales, construcción, explotación o disponibilidad de terreno que condicionan el sistema de depuración o aprovechamiento de las aguas residuales, es necesario buscar procesos de tratamiento económicos y fiables que permitan obtener, un agua residual apta para un uso específico (Painter, 1979).

### 2.2.1. Fases de tratamiento de aguas residuales

Estas incluyen una serie de procesos físicos, químicos y biológicos que tienen como fin eliminar los contaminantes presentes en el efluente del uso humano. Tales procesos de tratamiento son típicamente referidos a un tratamiento primario, donde principalmente se retienen sólidos; tratamiento secundario, donde se transforma la materia orgánica disuelta en sólidos suspendidos, para finalmente pasar a un tratamiento terciario o de refinado, ver figura 2.



**Figura 2: Esquema general de tratamiento de aguas servidas**

Fuente: Adaptado de CIDERH

### 2.2.2. *Desinfección*

La desinfección, perteneciente al tratamiento terciario, es el proceso de inactivación de organismos patógenos (causante de enfermedad) o para impedir su reproducción. Los organismos patógenos que se encuentran comúnmente en las aguas residuales domésticas incluyen bacterias, virus, helmintos y quistes de protozoos. El objetivo del proceso de desinfección es proteger al público de enfermedades transmitidas por el agua tales como el cólera, la fiebre tifoidea, la disentería, la hepatitis y la salmonella, entre otras. (Vera, 2014)

Existen diferentes métodos para desinfectar aguas servidas que incluyen agentes químicos (ejemplo: cloro, cloroamina, ozono, dióxido de cloro, permanganato de potasio, entre otros), agentes físicos (ejemplo: radiación UV) e irradiación (ejemplo: electromagnetismo, rayos gamma).

### 2.2.3. *Tecnologías convencionales de desinfección de aguas residuales*

Las plantas de tratamiento convencionales de depuración de aguas residuales se caracterizan por necesidades constructivas elevadas, bajo valor estético, y especialización para su operación.

#### a) Cloración

El cloro, es el desinfectante más usado para el tratamiento del agua residual doméstica porque destruye los organismos al ser inactivados mediante la oxidación del material celular. El cloro puede ser adicionado al agua como cloro gaseoso, líquido (hipoclorito de sodio) o sólido (hipoclorito de calcio). Cuando se agrega cloro al agua, la acción desinfectante y sanitaria que resulta es efectuada mediante un agente químico intermedio, el “Ácido Hipocloroso”. El cloro y el agua reaccionan para formar el ácido hipocloroso. El ácido hipocloroso es el que realmente mata a los microorganismos presentes en el agua. Esto se debe a que el ácido hipocloroso tiene la capacidad de difundirse a través de las paredes de las células y de llegar así a las partes vitales de la célula bacteriana (Ramalho, 1998).

La ventaja del sistema de desinfección por cloración es su bajo costo (excepto cuando la descoloración es requerida para evitar efectos tóxicos en el medio receptor, operación que en muchos casos anula la ventaja económica de la cloración). Otra ventaja es, el cloro residual que permanece en el efluente de agua servida puede prolongar el efecto de desinfección aún después del tratamiento inicial.

El cloro tiene el problema de oxidar ciertos tipos de materiales orgánicos del agua residual generando compuestos más peligrosos tales como los metanos trihalogenados, así como la formación de compuestos cancerígenos.

Cabe destacar también que el cloro residual, aún en bajas concentraciones, es tóxico a los organismos acuáticos y por ello puede requerirse la des-cloración. Se desconocen los efectos a largo plazo de la descarga de compuestos de la des-cloración al medio ambiente.

El grado de desinfección requerido de cualquier sistema de desinfección por cloración puede ser obtenido mediante la variación de la dosis y el tiempo de contacto, que generalmente es de 30 min. La dosis de cloro varía con base en la demanda de cloro, las características del agua residual y los requisitos de descarga del efluente (Ramalho, 1998).

Como se mencionó anteriormente uno de los propósitos del proyecto a desarrollar es dar continuidad a efluentes de sistemas de tratamiento no convencionales y es en la etapa del tratamiento biológico (secundario) en donde puede realizarse una diferenciación entre las tecnologías de tratamiento: a) tecnologías convencionales, y b) tecnologías no convencionales o tecnologías blandas. (CIDERH, 2017)

#### *2.2.4. Tecnologías blandas de tratamiento de aguas residuales*

La aplicación de tecnologías denominadas blandas al tratamiento de las aguas residuales encuentran un campo de aplicación especialmente adecuado en las pequeñas y medianas colectividades debido fundamentalmente a: a) su buen rendimiento en eliminación de patógenos; b) su facilidad de operación y mantenimiento y; c) buena integración en el medio rural.

##### a) Humedales

Los humedales son áreas que se encuentran saturadas por aguas superficiales o subterráneas con una frecuencia y duración tales, que sean suficientes para mantener condiciones saturadas. En los humedales crecen plantas acuáticas emergentes entre las que se encuentran: juncos, enneas y espadañas, entre otras, dichas plantas proporcionan superficie para el crecimiento de los microorganismos y permiten la filtración y adsorción de los contaminantes presentes en el agua residual, además de inhibir el crecimiento de las algas y favorecer la formación de zonas aerobias

alrededor de las raíces debido a las características de estas plantas de trastocar el oxígeno desde las hojas hasta las raíces. El sistema de tratamiento a través de pantanos o humedales artificiales con vegetación proporcionan un micro-entorno ideal para la sedimentación, filtración, adsorción y descomposición bacteriana de los componentes de aguas residuales, estos se han utilizado para el tratamiento del efluente primario de aguas residuales industriales, desagües ácidos de minas, lixiviado de relleno de tierra y desagüe urbano (Baca, 2012).

En cuanto a la remoción de microorganismos patógenos, los humedales artificiales requieren aplicar un proceso de desinfección adicional, puesto que en el efluente de estos se presenta una concentración significativa de coliformes totales, pudiendo ser mayores a 25.000 nmp/100ml; la finalidad no es reducir los microorganismos presente en el agua a cero, sino reducir el nivel de microorganismos dañinos a niveles más seguros de exposición, para el posterior uso de esta (AMEQA).

#### b) Lagunas de maduración

Las lagunas de maduración, en general prosiguen de un proceso de laguna facultativa primaria o secundaria, ver Figura 3, están diseñadas principalmente para el tratamiento terciario, es decir, la eliminación de patógenos, nutrientes y posiblemente algas. Son muy poco profundas, por lo general de 0.9 a 1 m, esto, para permitir la penetración de la luz a la parte inferior y condiciones aeróbicas durante toda la profundidad. (Gonzales, 2016).

El objetivo principal de las lagunas de maduración es producir un efluente de alta calidad. El tiempo de retención de una laguna de maduración, así como el número de lagunas, está condicionado por el grado de depuración bacteriana que se quiere.



**Figura 3: Lagunas de maduración.**

### 2.3. Radiación solar

La radiación solar es el conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas por el Sol en todas las direcciones del espacio. El Sol es una estrella que se encuentra a una temperatura media de 6000 K, en cuyo interior tienen lugar una serie de reacciones de fusión nuclear que producen una pérdida de masa que se transforma en energía. Esta energía liberada del Sol se transmite al exterior mediante la radiación solar.

La potencia total que es capaz de producir el sol es de  $3,8 \cdot 10^{20}$  [MW]. Sin embargo, la radiación que efectivamente llega a la superficie del planeta es menor debido a que depende de las condiciones atmosféricas, altura sobre el nivel del mar y altura solar (latitud, fecha y hora del día); cuando los rayos solares inciden perpendicular a la superficie la intensidad de la radiación es mayor a cuando el ángulo de incidencia sea más oblicuo (Romero Tous, 2009).

Tipos de radiación:

En función de cómo reciben la radiación solar los objetos situados en la superficie terrestre, se pueden distinguir estos tipos de radiación:

- Radiación directa

Es aquella que llega directamente del Sol sin haber sufrido cambio alguno en su dirección.

- Radiación difusa

Parte de la radiación que atraviesa la atmósfera es reflejada por las nubes o absorbida por éstas. Esta radiación, que se denomina difusa, va en todas direcciones, como consecuencia de las reflexiones y absorciones, no sólo de las nubes sino de las partículas de polvo atmosférico, montañas, árboles, edificios, el propio suelo, etc.

- Radiación reflejada

La radiación reflejada es, como su nombre indica, aquella reflejada por la superficie terrestre. La cantidad de radiación depende del coeficiente de reflexión de la superficie, también llamado albedo.

- Radiación global

Suma de las radiaciones directa, difusa y reflejada.

### 2.3.1. Radiación ultravioleta

La luz ultravioleta es la porción del espectro electromagnético que se encuentra entre los rayos X y la luz visible. Se han definido cuatro regiones del espectro ultravioleta, vacío UV entre 100 y 200 nm, UV-C entre 200 y 280 nm, UV-B entre 280 nm y 315 nm, y UV-A entre 315 nm y 400 nm (Meulemans, 1986).

El rango UV-C es el considerado mayoritariamente germicida, debido a que los rayos con longitud de onda entre 240 – 280 nm son fuertemente absorbidos por los ácidos nucleicos. Por lo que, el mecanismo de desinfección por UV tiene relación mayoritariamente con la inactivación de los ácidos nucleicos en los microorganismos, debido a que el ADN (ácido desoxirribonucleico) y el ARN (ácido ribonucleico) llevan la información genética usada en la reproducción.

Sin embargo, a causa de la absorción por parte de la atmósfera terrestre, el 99 % de los rayos ultravioletas que llegan a la superficie de la Tierra son del tipo UV-A. La atmósfera ejerce una fuerte absorción que impide que la atraviese toda radiación con longitud de onda inferior a 290 nm. La radiación UV-C no llega a la tierra porque es absorbida por el oxígeno y el ozono de la atmósfera. La radiación UV-B es parcialmente absorbida por el ozono y llega a la superficie de la tierra.

La radiación UV-A interactúa directamente con el ADN, los ácidos nucleicos y las enzimas de las células vivas, cambia la estructura molecular y puede producir la muerte de la célula. También reacciona con el oxígeno disuelto en el agua y produce formas altamente reactivas de oxígeno (radicales libres de oxígeno y peróxidos de hidrogeno). Estas moléculas también interfieren con las estructuras celulares y matan a los patógenos (Meierhofer & Wegelin, 2003).

- a) Parámetros importantes de la radiación UV relacionados con la desinfección del agua (Organización Panamericana de la Salud, 2005).
  - Longitud de onda

El rango germicida se encuentra entre 240 y 280 nm y se obtiene la máxima eficiencia desinfectante cerca de los 260 nm.

- Calidad del agua

La energía ultravioleta es absorbida por el agua, pero en mucho mayor grado es absorbida por los sólidos en suspensión o disueltos, turbiedad y color. Por lo tanto, la turbiedad debe ser tan baja como sea posible.

- Intensidad de la radiación

A menor distancia del agua respecto al punto de emisión de los rayos, mayor será la intensidad de los mismos y por tanto la desinfección será más eficiente.

- Tipo de microorganismos

La resistencia al efecto de la radiación dependerá del tipo de microorganismo. No obstante, la dosificación de luz ultravioleta requerida para destruir los microorganismos más comunes (coliformes, pseudomonas, etc.) varía entre 6.000 y 10.000  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ .

- Tiempo de exposición

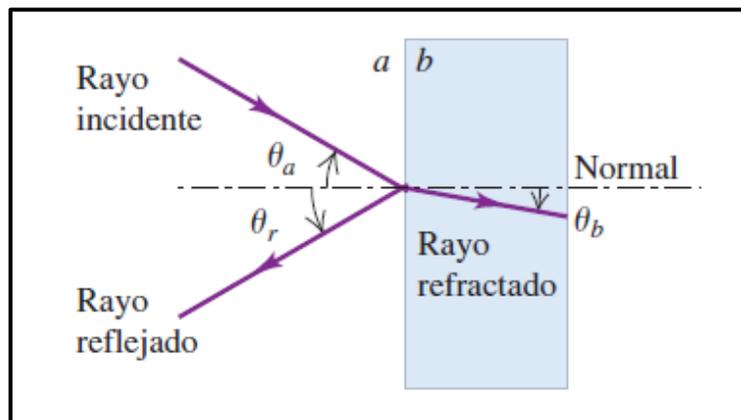
Como cualquier otro desinfectante, el tiempo de exposición es vital para asegurar un buen desempeño. No es fácil determinar con exactitud el tiempo de contacto (ya que éste depende del tipo de flujo y de las características del equipo), pero el período debería estar relacionado con la dosificación necesaria.

### 2.3.2. Reflexión y refracción.

Cuando una onda luminosa incide en una interfaz lisa que separa dos materiales transparentes, la onda en general es reflejada parcialmente y también refractada (transmitida) parcialmente hacia el segundo material. A medida que un rayo pasa a través del material, parte de este puede ser absorbida, con lo que decrece la energía contenida en el rayo refractado (Tipler & Mosca, 2003).

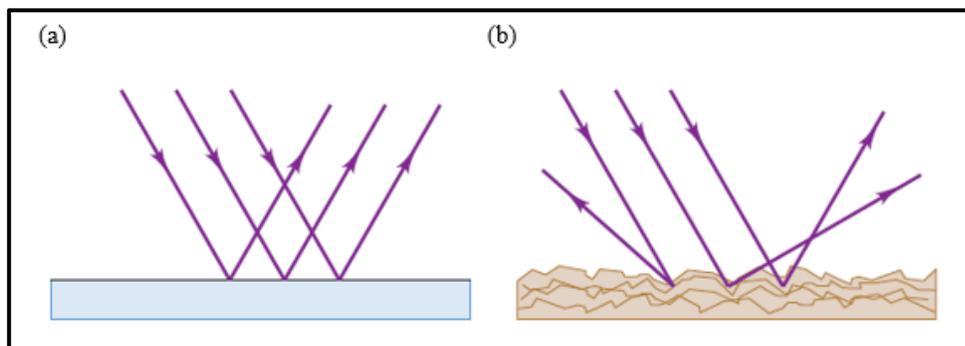
Se describen las direcciones de los rayos incidente, reflejado y refractado (transmitidos) en una interfaz lisa entre dos materiales ópticos en términos de los ángulos que forman con la normal (perpendicular) a la superficie en el punto de incidencia, como se ilustra en la Figura 4. Si la interfaz es rugosa, tanto la luz transmitida como la reflejada se dispersan en varias direcciones y no hay un ángulo único de transmisión o reflexión. La reflexión con un ángulo definido desde una superficie muy lisa se llama reflexión especular (del vocablo latino que significa “espejo”), ver Figura 5.a. La reflexión dispersa a partir de una superficie áspera se llama reflexión difusa (Figura 5.b). Ambas

clases de reflexión ocurren con materiales transparentes o con materiales opacos que no transmiten la luz.



**Figura 4: Diagrama de reflexión y refracción.**

*Fuente: Zemansky (2009)*



**Figura 5: Diagrama de reflexión especular y difusa.**

*Fuente: Zemansky (2009).*

- *Leyes de reflexión y refracción*

Los estudios experimentales de las direcciones de los rayos incidentes, reflejados y refractados en una interfaz lisa entre dos materiales ópticos condujeron a las siguientes conclusiones:

- Los rayos incidente, reflejado y refractado, así como la normal a la superficie, yacen todos en el mismo plano. El plano de los tres rayos es perpendicular al plano de la superficie de frontera o límite entre los dos materiales. Siempre se dibujan los diagramas de los rayos de manera que los rayos incidente, reflejado y refractado estén en el plano del diagrama.

- El ángulo de reflexión  $\theta_r$  es igual al ángulo de incidencia  $\theta_a$ , tal como muestra la Ecuación 1, para todas las longitudes de onda y para cualquier par de materiales. Es decir, en la figura 4,

$$\theta_r = \theta_a \quad (\text{Ley de reflexión}) \quad \text{Ec. (1)}$$

Esta relación, junto con la observación de que los rayos incidente y reflejado y la normal yacen en el mismo plano, se conoce como ley de reflexión.

- Para la luz monocromática y para un par dado de materiales,  $a$  y  $b$ , en lados opuestos de la interfaz, la razón de los senos de los ángulos  $\theta_a$  y  $\theta_b$ , donde los dos ángulos están medidos a partir de la normal a la superficie, es igual al inverso de la razón de los dos índices de refracción ( $n$ ), ver Ecuación 2:

$$n_a \cdot \text{sen } \theta_a = n_b \cdot \text{sen } \theta_b \quad (\text{Ley de refracción}) \quad \text{Ec. (2)}$$

### **3. CAPITULO III: METODOLOGIA**

En este capítulo se detalla la metodología utilizada para el desarrollo de las experiencias, además de las consideraciones y criterios empleados para llevar a cabo cada actividad.

#### **3.1. Selección del sitio**

La experiencia del proyecto de título se llevó a cabo en las dependencias de la Universidad del Bío – Bío, Campus Concepción. El sitio utilizado fue seleccionado anteriormente por Ortiz (2016), según los siguientes criterios y consideraciones: ser un terreno despejado donde no exista sombra que interfiera con los canales de 10:00 a 18:00 h, además de contar con fácil acceso vehicular para el transporte de los materiales en la etapa de construcción y también para el traslado de las aguas residuales, con una red de agua potable cerca para el lavado de los canales antes y después de ser utilizados, y que cuente con cierre perimetral, evitando así el acceso de personas y/o animales que puedan dañar las instalaciones.

#### **3.2. Materiales y equipos utilizados**

##### *3.2.1. Canales*

Se utilizaron tres canales reflectantes experimentales con distintas características. Dos de ellos fueron diseñados y construidos por Ortiz (2016), canal 1 A de sección transversal rectangular y canal 2 A de sección transversal trapecial, ambos canales de paredes de acero galvanizado, ver Anexo A. El tercer canal, se denominará “canal 2 B”, el cual se construirá bajo el mismo diseño que el canal 2 A (ver Figura A1 (b)), pero con distinto material reflectante.

- a) Componentes del canal 2 B
  - Material reflectante

Con el fin de determinar un material con propiedades de reflexión superior se montó un sistema de sensores de luz, revisar punto 3.2.3. De esta forma se concluyó que el acero inoxidable cumple con lo requerido, arrojando una reflexión del 100% en relación a la luz incidente, ver Anexo B.

Una vez determinado el material se adquirieron planchas de acero inoxidable de 0,4x1000x2000 mm, las que fueron plegadas y adheridas en la estructura del canal 2 B (Figura C2) con silicona de montaje y tornillos auto perforantes.

### 3.2.2. Paneles reflectantes

Con el propósito de lograr una mayor eficiencia en la remoción de coliformes es que se evaluará el aporte de paneles reflectantes en los canales experimentales.

#### a) Diseño de los paneles

De la misma forma que en los canales, la elección del diseño de los paneles se basa en una estructura simple y de bajo costo, con una materialidad que permita la reflexión de la radiación solar.

La distancia horizontal de los paneles respecto a los canales, así como la altura, se escoge para evitar que la sombra de estos interfiera a lo largo del canal.

Los paneles se instalan con una inclinación de 41° con respecto a la horizontal, de manera que estos queden paralelos a la sección inclinada de la vista transversal de los canales de geometría trapecial, ver figura A1. La instalación de los paneles se muestra en el Anexo C, Figura C3.

#### b) Componentes de los paneles

- Estructura de madera

Los paneles son construidos con pino en bruto de 2x1 pulgadas y son soportados por secciones de pino en bruto de 4x1 pulgadas. Las dimensiones de los paneles son de 200x5x30 cm.

- Material reflectante

Para construir los paneles reflectantes se utilizará el mismo material reflectante determinado para el canal 2 B.

### 3.2.3. *Medidor de intensidad de luz*

Para determinar el material reflectante a utilizar en el canal 2 B y en los paneles se montó un sistema que permite medir, en porcentajes, la intensidad de luz reflejada por distintos materiales.

El sistema cuenta con una fuente de luz, un sensor de movimiento giratorio y un sensor de luz, el cual está conectado a una interfaz USB 750, Modelo No. CI-7599, que es capaz de transformar las señales generadas para ser interpretadas por medio del Software DataStudio.

### 3.2.4. *Medidor de radiación ultravioleta*

El medidor de radiación elegido para monitorear la radiación ultravioleta (UVA-UVB) durante las experiencias se adquirió en la empresa de instrumentación industrial/agrícola, INSUMAC. El modelo PUV-360, ver Figura C4, posee un circuito de microprocesador que proporciona alta fiabilidad y durabilidad. Las especificaciones técnicas del medidor se pueden ver en el Anexo D.

## 3.3. **Procedimiento**

Para llevar a cabo las experiencias se utilizará agua residual retirada desde el sedimentador de la planta de tratamiento de aguas residuales, ubicada en la comuna de Hualqui, ver Anexo C, Figura C5.

Las actividades realizadas para cumplir con los objetivos propuestos se agruparán en Escenarios, cuyos procedimientos serán descritos a continuación. Es importante señalar que todos los Escenarios se desarrollaran en días distintos y en cada uno de ellos se llevara un control de la radiación UV.

### 3.3.1. *Escenario 1 (a) y (b)*

Busca evaluar el impacto de la geometría y materialidad del canal en la eficiencia de eliminación de coliformes, respondiendo de esta forma, a los objetivos propuestos a) y b). Este escenario se realizó dos veces (Escenario 1 (a) y Escenario 1 (b)), sin cambiar gran parte de su desarrollo, solo los días en que se llevaron a cabo las experiencias y los tiempos de residencia hidráulicos (TRH).

En este Escenario se requiere el uso de los tres canales, canal 1 A, 2 A y 2 B, los cuales operarán en forma paralela. Con el fin de evaluar el impacto de la geometría se comparará la eficiencia en eliminación de coliformes del canal 1 A con el canal 2 A, mientras que, para evaluar el impacto de la materialidad del canal se comparará la eficiencia en eliminación de coliformes del canal 2 A con el canal 2 B, cuyas características relevantes en el análisis se indican en la tabla 4.

**Tabla 4: Características Relevantes de los Canales Según Análisis a Realizar.**

Análisis	Geometría		Materialidad	
Canal	1 A	2 A	2 A	2 B
Características	sección transversal rectangular/ acero galvanizado	sección transversal trapecial/ acero galvanizado	sección transversal trapecial/ acero galvanizado	sección transversal trapecial/ acero inoxidable

*Fuente: Elaboración propia*

a) Volumen de agua

El volumen de agua residual dispuesta por canal es de 80 l.

b) Tiempo de residencia Hidráulico

Para la experiencia se contemplan 5 TRH para el Escenario 1 (a) y 7 TRH para el Escenario 1 (b). Los TRH determinados para el Escenario 1 (a) se emplearán también en el Escenario 2 y 3.

TRH Escenario 1 (a)

- TRH<sub>1</sub>= 45 min
- TRH<sub>2</sub>= 90 min
- TRH<sub>3</sub>= 135 min
- TRH<sub>4</sub>= 180 min
- TRH<sub>5</sub>= 225 min

TRH Escenario 1 (b)

- TRH<sub>1</sub>= 30 min
- TRH<sub>2</sub>= 60 min
- TRH<sub>3</sub>= 90 min
- TRH<sub>4</sub>= 120 min
- TRH<sub>5</sub>= 150 min
- TRH<sub>6</sub>= 180 min
- TRH<sub>7</sub>= 210 min

c) Operación de los canales

Los canales son alimentados con agua residual a la misma hora, una vez vertida el agua sobre los canales se deja en reposo y expuesta a la luz solar. Para asegurar que las muestras sean más representativas se revuelve todo el contenido del canal cada 1 hora. Pasado las 3.45 horas de exposición, se procede a vaciar los canales, vertiendo el agua en una cámara sanitaria contigua, finalmente se lavan con agua potable.

La operación de los canales se realizará de la misma forma en todos Escenarios.

3.3.2. Escenario 2

Busca evaluar el impacto de la altura de la columna de agua, dando respuesta al objetivo c). Así mismo, se espera dar respuesta al objetivo d), instalando, en los canales, paneles reflectantes.

Para llevar a cabo la experiencia se utilizará dos canales, el canal 2 B y el canal 2 A, al cual se le cambiara su materialidad, sustituyendo el acero galvanizado por acero inoxidable. Con el objetivo de evaluar el impacto de la altura de la columna de agua, se compararán los canales mencionados, con distintos volúmenes de agua residual, los cuales presentan las características descritas en la tabla 5. Por otro lado, para evaluar el impacto de los paneles reflectantes en la eficiencia de eliminación de coliformes se comparará el canal 2 B del “Escenario 1 (a)” con el canal 2 A de este Escenario.

**Tabla 5: Características Relevantes de los Canales Según Análisis a Realizar.**

Análisis	Volumen de agua		Paneles reflectantes	
	2 A	2 B	2 A	2 B (Escenario 1 (a))
Características	geometría trapezoidal/ acero inoxidable/ paneles	geometría trapezoidal/ acero inoxidable/ paneles	geometría trapezoidal/ acero inoxidable/ paneles	Geometría trapezoidal/ acero inoxidable/ sin paneles

Fuente: Elaboración propia

a) Volumen de agua

En este Escenario se trabajará con dos volúmenes de agua residual, el canal 2 A dispondrá de un volumen de 80 l, mientras que el canal 2 B tendrá un volumen de 160 l. La altura de la columna de agua será de 11.4 y 19.9 cm, respectivamente.

3.3.3. *Escenario 3*

El “Escenario 3” pretende dar respuesta al objetivo e), el cual busca establecer una relación entre la radiación ultravioleta y la eliminación de coliformes.

Para cumplir con lo propuesto se requiere utilizar el canal 2 B, cuya eficiencia en la eliminación de coliformes será analizada junto con la eficiencia obtenida por el mismo canal en el “Escenario 1 (a) y 1 (b)”.

a) Volumen de agua

El volumen de agua residual dispuesta para cada canal es de 80 l.

- Toma de muestras

La toma de muestras se realiza de la misma manera para todos los Escenarios. La primera muestra es tomada al verter el agua de los bidones a los canales, usando un frasco de 250 ml entregado por el laboratorio de aguas de BIODIVERSA. Las siguientes muestras se toman cada 45 minutos, y todas utilizando la misma técnica. Esta consiste en llenar el frasco por medio de un recipiente, procurando que el agua no toque los bordes de la boquilla para así no quitar los químicos que se encuentran en esta, ver Anexo C, Figura C7. Una vez llenado el frasco hasta la cantidad indicada se debe tapar adecuadamente.

Cada vez que se toma una muestra esta es introducida en un cooler, que tiene bolsas de hielo en su interior. Cuando se introduce la última muestra se procede a enviar los frascos para su posterior análisis en el laboratorio de aguas de BIODIVERSA.

#### 4. CAPITULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se muestran los resultados en la eficiencia de eliminación de coliformes obtenidos en cada uno de los Escenarios, los cuales fueron entregados por el laboratorio de aguas BIODIVERSA.

##### 4.1. Análisis de resultados Escenario 1 (a) y (b)

Estos buscaban dar respuesta a los objetivos propuestos a) y b), los que tienen relación con evaluar el impacto de la geometría y materialidad del canal en la eficiencia de eliminación de coliformes.

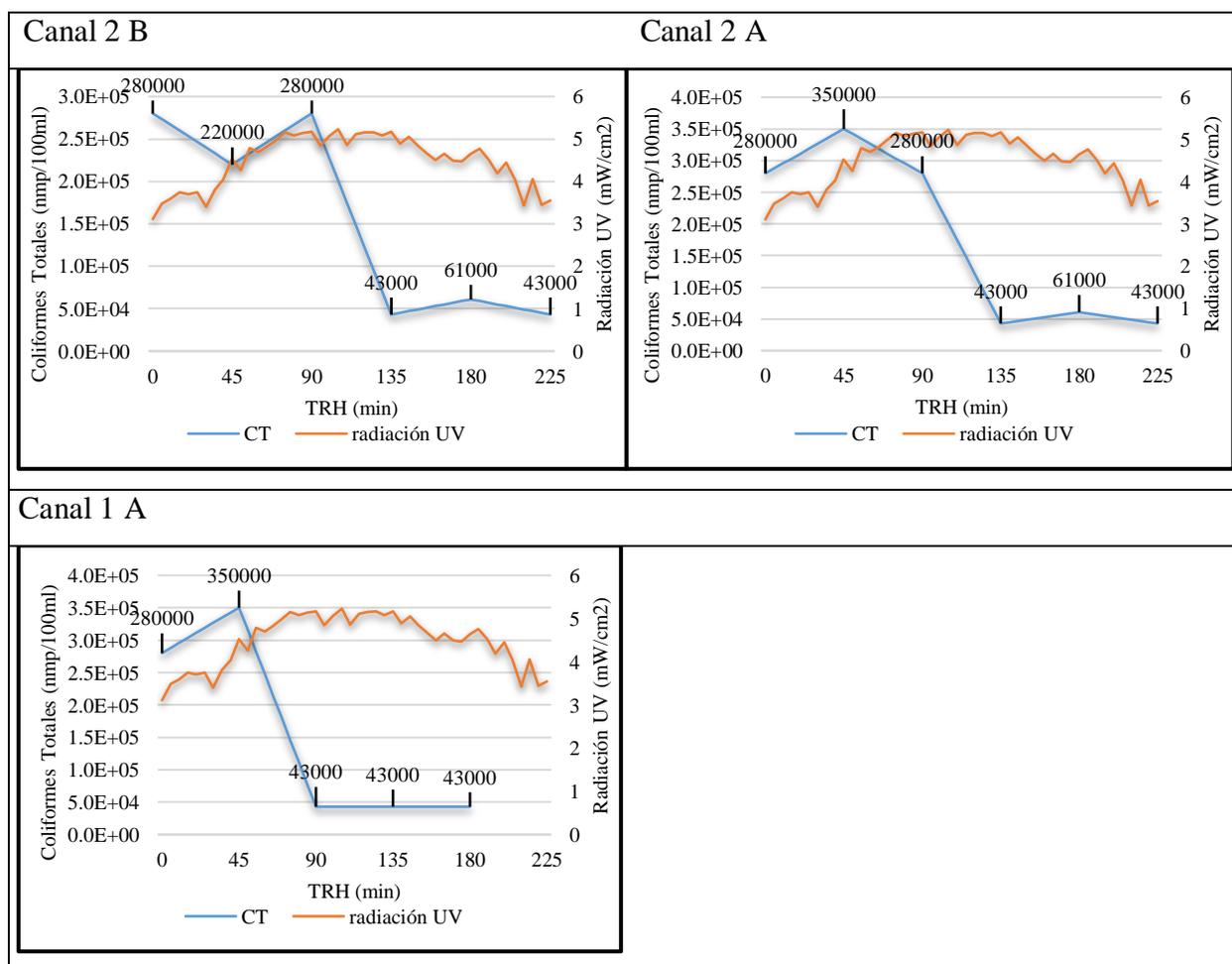
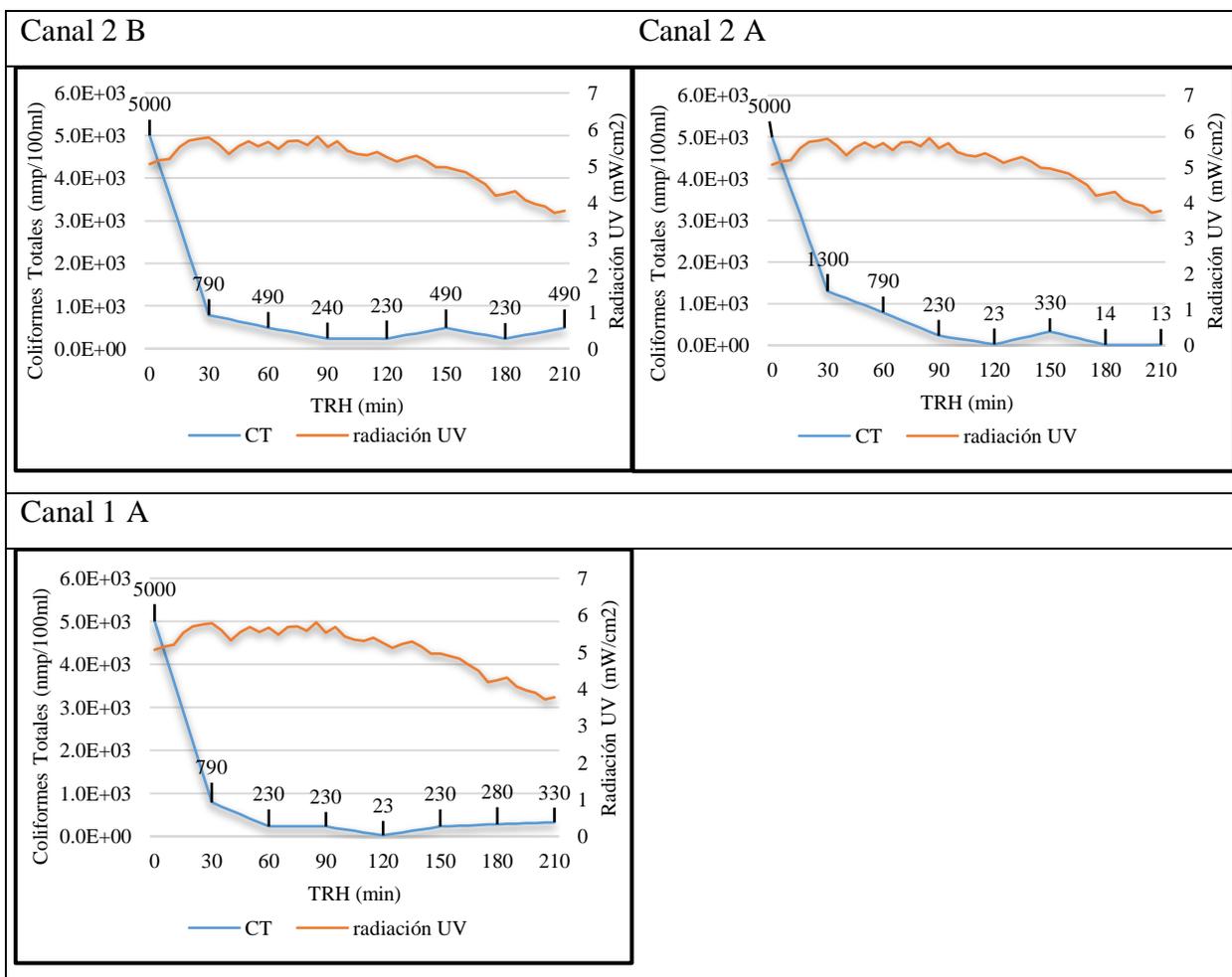


Figura 6: Resultados análisis Escenario 1 (a)

Fuente: Elaboración propia.

La radiación UV promedio obtenida en el Escenario 1 (a) fue de 4.47 mW/cm<sup>2</sup>.



**Figura 7: Resultados análisis Escenario 1 (b)**

*Fuente: Elaboración propia.*

La radiación UV promedio obtenida en el Escenario 1 (b) fue de 5.1 mW/cm<sup>2</sup>.

#### 4.1.1. Análisis de geometría de la sección transversal del canal

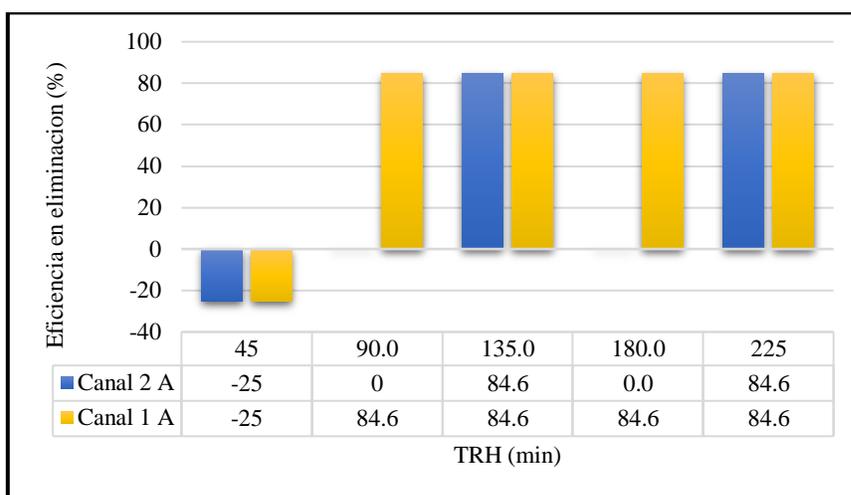
En las Figuras 6 y 7, se muestran los resultados obtenidos en la eliminación de coliformes en el canal 2 A y 1 A, en los distintos TRH establecidos. Así también, en cada uno de los gráficos, se muestra la radiación ultravioleta monitoreada durante la experiencia.

Los canales 2 A y 1 A, en el Escenario 1 (a), comienzan con una concentración de coliformes de 280.000 nmp/100ml, para luego descender una vez finalizada la experiencia a 43.000 nmp/100ml. El rango de radiación UV obtenido va desde 3 a 5 mW/cm<sup>2</sup>. Mientras que, en el Escenario 1 (b), en donde se muestra una clara tendencia de reducción de coliformes, los canales comienzan con una

concentración de 5.000 nmp/100ml para llegar a una concentración de coliformes de 13 y 330 nmp/100ml en el canal 2 A y 2 B, respectivamente. El rango de radiación UV obtenido en este Escenario va desde 4 a 6 mW/cm<sup>2</sup>.

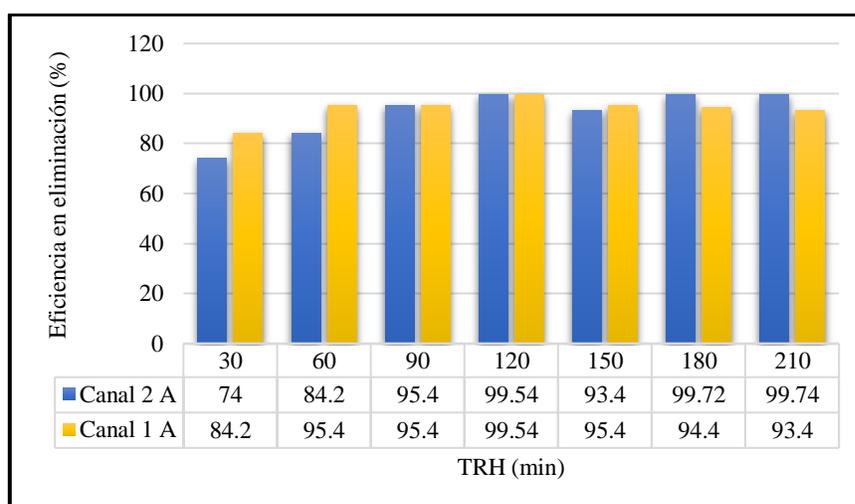
a) Eficiencia de eliminación de coliformes

Con los resultados anteriores se realizó un análisis comparativo de la eficiencia de remoción de coliformes para los distintos TRH de cada canal, se observa que los dos canales lograron eficiencias de remoción mayores al 80% y 90 % para la Experiencia 1 (a) y (b), respectivamente.



**Figura 8: Eficiencia en eliminación de coliformes Escenario 1 (a)**

*Fuente: Elaboracion propia*



**Figura 9: Eficiencia en eliminación de coliformes Escenario 1 (b)**

*Fuente: Elaboracion propia*

De la Figura 8, se observa que no existe relevancia en la geometría transversal de los canales, ya que ambos alcanzaron un 84.6% de eficiencia en eliminación de coliformes. Sin embargo, de la Figura 9 se desprende que el canal 2 A, de geometría transversal trapecial, logra una disminución final de coliformes de 99.74%, mientras que el canal 1 A, de sección transversal rectangular, obtuvo un 93.4 %. Si bien, el canal 2 A logro una eficiencia superior al canal 1 A, la diferencia de eficiencias alcanzada no es categórica (6.34%).

Es importante mencionar que en el Escenario 1 (b), en donde se obtuvieron eficiencias superiores al Escenario 1 (a), la radiación UV promedio fue superior.

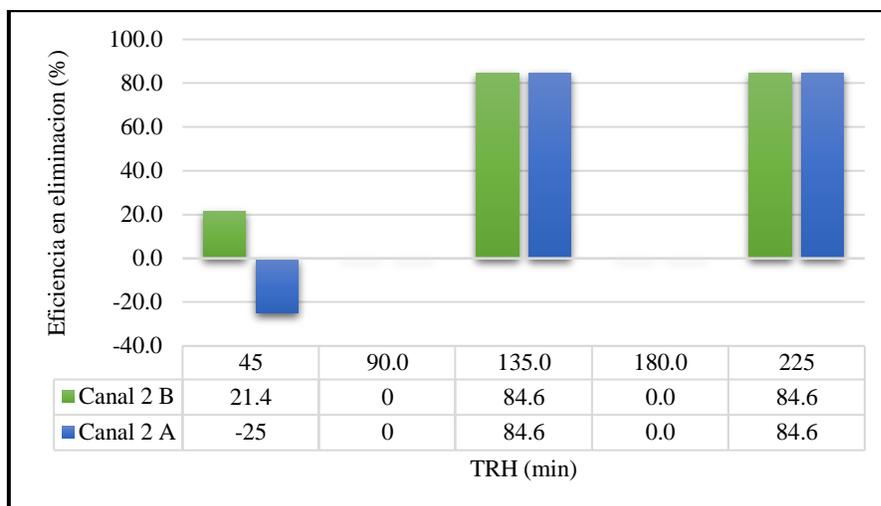
#### *4.1.2. Análisis de la materialidad del canal*

En la Figura 6 y 7, se muestran los resultados obtenidos en la eliminación de coliformes en el canal 2 B y 1 A, en los distintos TRH establecidos y la radiación ultravioleta monitoreada durante la experiencia.

Los resultados obtenidos por el canal 2 A, construido con acero galvanizado, se analizaron en el punto 4.1.1. Del canal 2 B se observa que comenzó con concentraciones de 280.000 y 5.000 nmp/100ml, para luego terminar las experiencias con concentraciones de coliformes de 43.000 y 490 nmp/100ml, en el Escenario 1 (a) y (b), respectivamente.

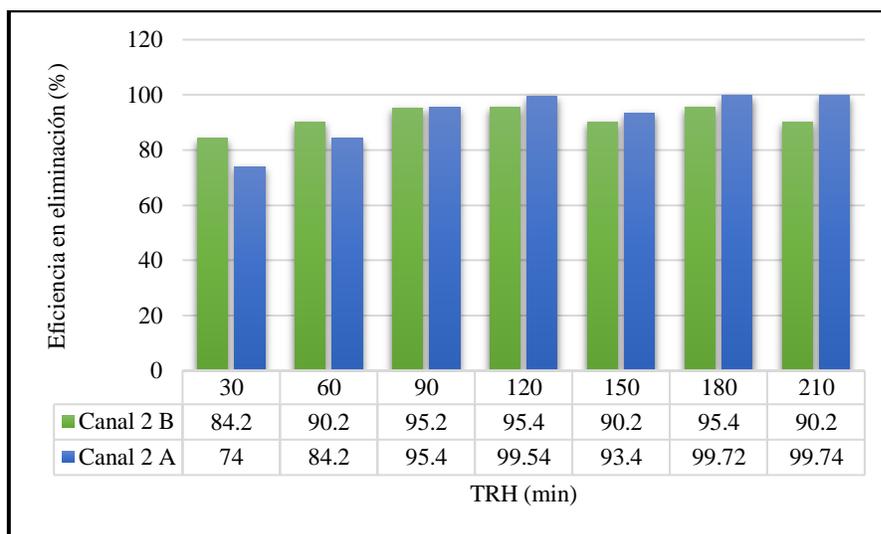
##### a) Eficiencia de eliminación de coliformes

Al igual que para el análisis de la geometria del canal, con los resultados del canal 2 A y 2 B se realizó un análisis comparativo de la eficiencia de remoción de coliformes para los distintos TRH de cada canal, se observa que los dos canales lograron eficiencias de remoción mayores al 80% y 90% para la Experiencia 1 (a) y (b), respectivamente.



**Figura 10: Eficiencia en eliminación de coliformes Escenario 1 (a)**

*Fuente: Elaboracion propia*



**Figura 11: Eficiencia en eliminación de coliformes Escenario 1 (b)**

*Fuente: Elaboracion propia*

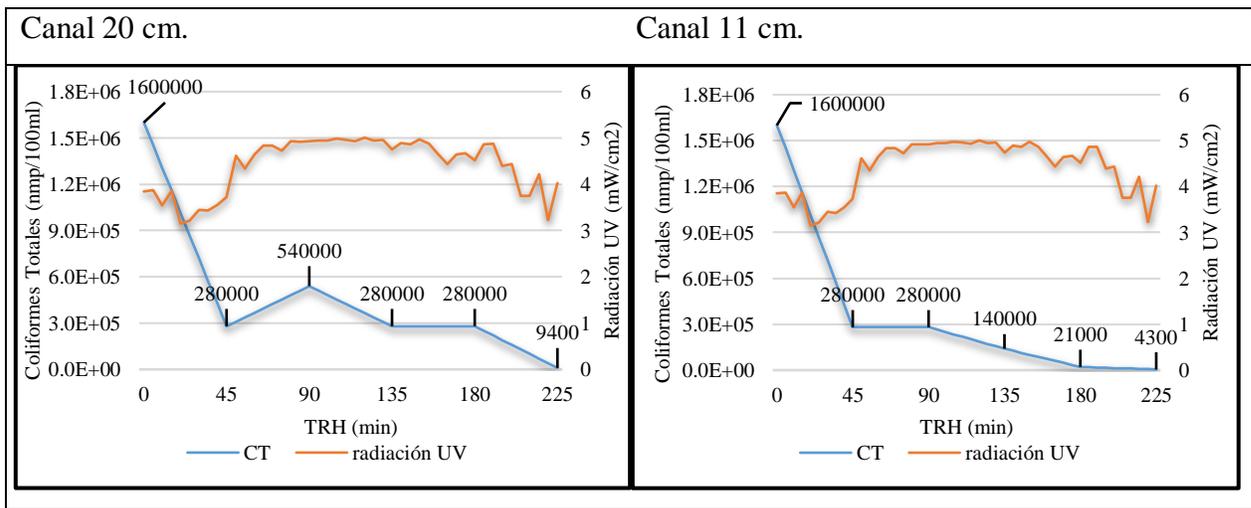
Al igual que para el análisis de geometría de la sección transversal del canal no se observa una diferencia categórica para el caso de la materialidad en el Escenario 1 (a), Figura 10, ya que ambas materialidades alcanzaron un 84.6% de eficiencia en eliminación de coliformes, aun cuando el acero inoxidable refleja un 44.9% más la intensidad de luz.

En el Escenario 1 (b), Figura 11, se observa que, si bien el canal 2 B comienza con mayores eficiencias de eliminación de coliformes en la primera hora de exposición, el canal 2 A logra una

mayor eficiencia final (99.74%). De este Escenario se puede decir que la diferencia en eficiencias de eliminación (9.54%) indica que el canal 2 A es más óptimo.

#### 4.2. Análisis de resultados Escenario 2

En el Escenario 2 se buscaba evaluar el impacto del volumen de agua dispuesto en los canales, dando respuesta al objetivo c). Así mismo, se espera dar respuesta al objetivo d), instalando, en los canales, paneles reflectantes.



**Figura 12: Resultados análisis Escenario 2**

*Fuente: Elaboracion propia*

La radiación UV promedio obtenida en el Escenario 2 fue de 4.41 mW/cm<sup>2</sup>.

##### 4.2.1. Análisis del volumen de agua dispuesto en el canal

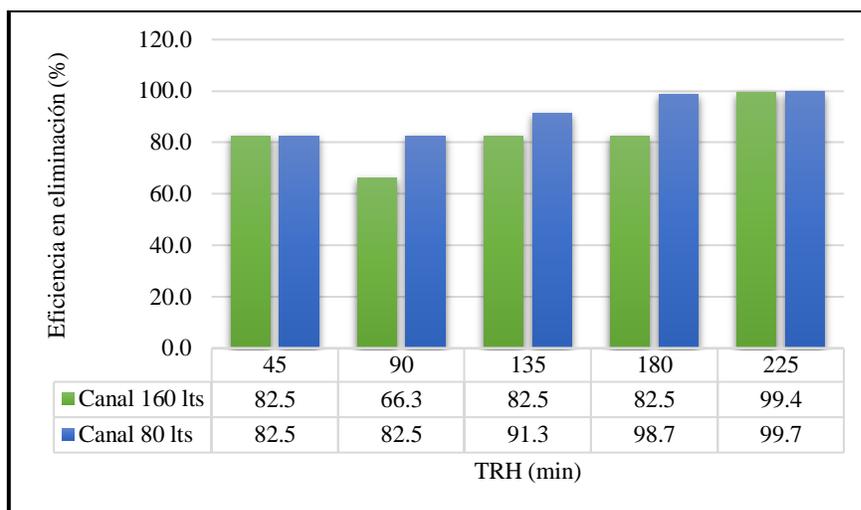
Para analizar el efecto de la altura de la columna de agua en cada canal se muestran los resultados obtenidos por el canal con 20 y 11 cm. en la Figura 12, en los distintos TRH establecidos. Así también, en cada uno de los gráficos, se muestra la radiación ultravioleta monitoreada durante la experiencia. Es importante recordar que en ambos canales se instalaron paneles reflectantes.

En la Figura 12 se muestra una clara tendencia de reducción en la cantidad de coliformes, en ambos canales, y específicamente en los primeros 45 minutos de exposición se registra una eliminación

de un 82.5 %. Los canales comienzan con una concentración de coliformes de 1.600.000 nmp/100ml y finalizan la experiencia con una concentración de 9400 y 4300 nmp/100ml para el canal de 20 y 11 cm., respectivamente.

a) Eficiencia de eliminación de coliformes

Con los resultados de los canales se realizó un análisis comparativo de la eficiencia de remoción de coliformes para los TRH de cada canal, se observa que los dos canales lograron eficiencias de remoción cercanas al 100%.



**Figura 13: Eficiencia en eliminación de coliformes Escenario 2**

*Fuente: Elaboracion propia*

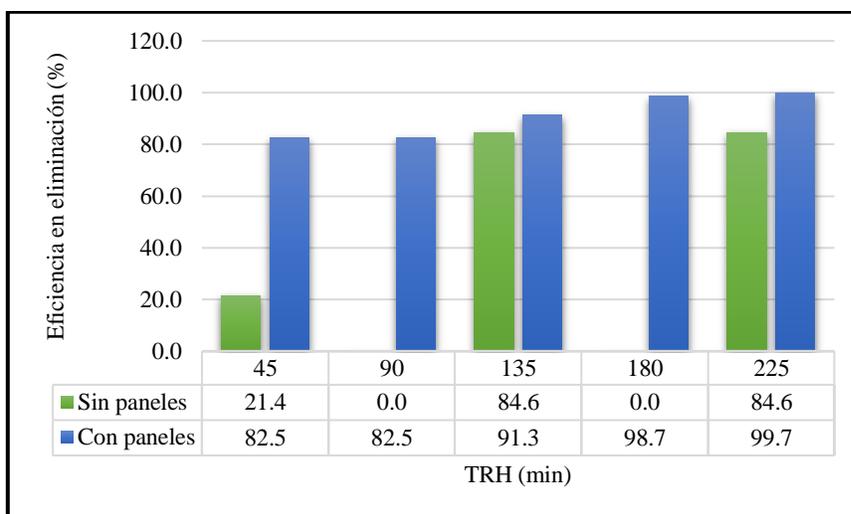
De la Figura 13 se observa que se obtuvo una eficiencia de eliminación mayor con una menor altura de agua residual, sin embargo, la diferencia presentada entre las eficiencias finales es de un 0.3%, cifra de poca relevancia si se piensa en aprovechar la capacidad del canal. Pero si se observan las eficiencias de los TRH de 90, 135 y 180 minutos se puede apreciar que, las diferencias en términos de eficiencia entre los canales alcanzan hasta un 16%, siendo el canal con 11cm. superior en cada uno de los TRH.

#### 4.2.2. Análisis de paneles reflectantes

Para el análisis de la incorporación de paneles reflectantes se analizarán los datos obtenidos en el Escenario 1 (a) por el canal 2 B (sin paneles reflectantes), ver Figura 6, punto 4.1.2., los cuales se compararán con los expuestos en la Figura 12 del presente Escenario (punto 4.2.1.), del canal con 80 l. de agua residual y con incorporación de paneles reflectantes.

##### a) Eficiencia de eliminación de coliformes

Con los resultados de los canales se realizó un análisis comparativo de la eficiencia de remoción de coliformes para los cinco TRH de cada canal, se observa que los dos canales lograron eficiencias de remoción superiores al 80 %. Es importante recordar que en la Etapa 1 (sin paneles) se obtuvo una radiación UV promedio de 4.469 mW/cm<sup>2</sup>, mientras que en la Etapa 2 (con paneles) fue de 4.409 mW/cm<sup>2</sup>.



**Figura 14: Eficiencia en eliminación de coliformes Escenario 2**

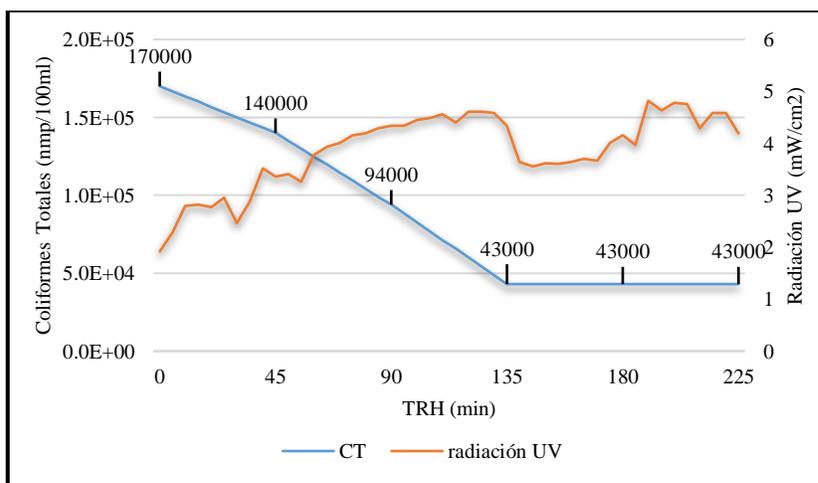
*Fuente: Elaboracion propia*

De la Figura 14 se observa que, los paneles aumentaron de manera significativa la eficiencia de eliminación de coliformes, a pesar de que durante ese Escenario se obtuvo un promedio de radiación UV menor. Por lo que se deduce que la implementación de paneles actúa de forma eficiente en la reflexión de la luz solar y causan un impacto satisfactorio en la remoción de coliformes.

### 4.3. Análisis de resultados Escenario 3

El Escenario 3 pretende dar respuesta al objetivo e), el cual busca establecer una relación entre la radiación ultravioleta y la eliminación de coliformes.

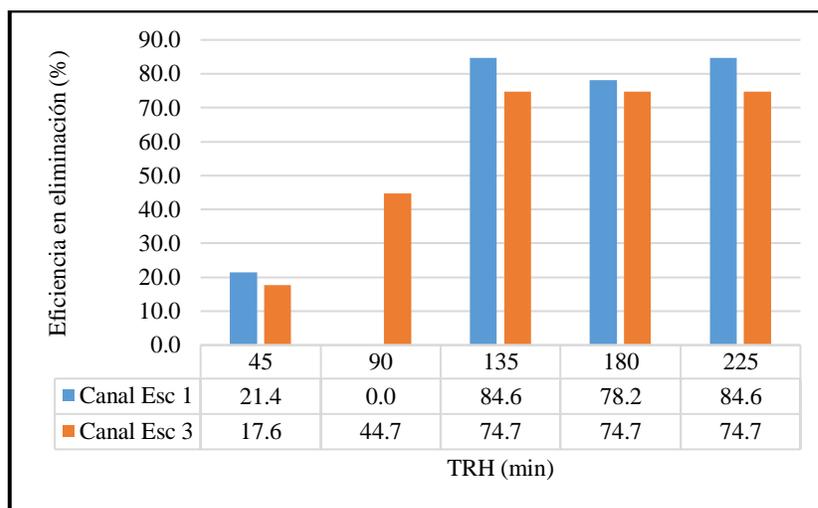
Para cumplir con lo propuesto se requiere utilizar el canal 2 B, cuya eficiencia en la eliminación de coliformes será analizada junto con la eficiencia obtenida por el mismo canal en el Escenario 1 (a) y el Escenario 2.



**Figura 15: Resultados análisis Escenario 3**

Fuente: Elaboración propia

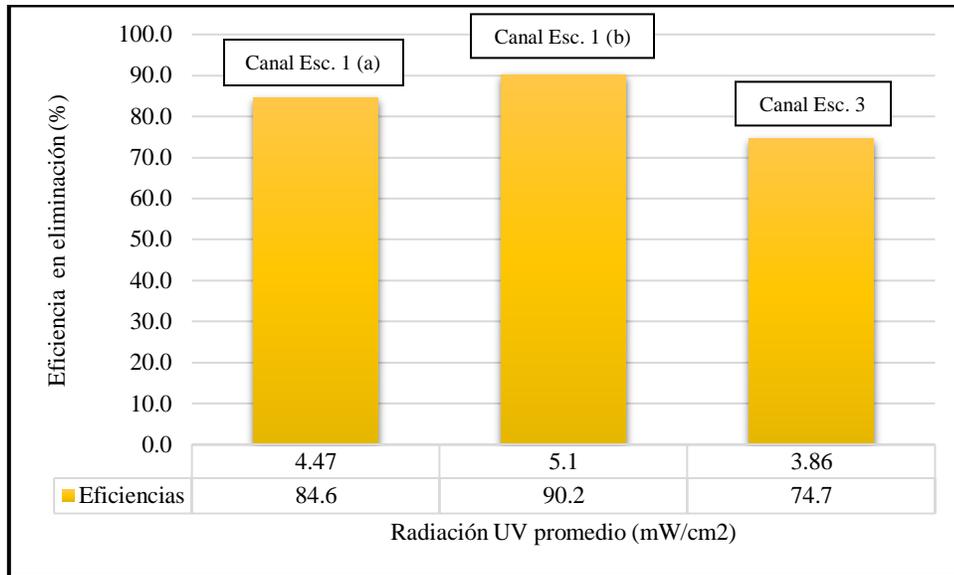
La radiación UV promedio obtenida en el Escenario 3 fue de 3.86 mW/cm<sup>2</sup>.



**Figura 16: Eficiencia en eliminación de coliformes Escenario 3**

Fuente: Elaboración propia

De la Figura 16 se observa que en el Escenario 1 (a) se obtuvo una mayor eficiencia de remoción de coliformes con una radiación UV promedio de 4.47 mW/cm<sup>2</sup>, mientras que para este Escenario se obtuvo una eficiencia menor con un menor promedio de radiación UV, lo cual evidencia el efecto de la radiación UV en la eliminación de coliformes. Para ejemplificar de mejor forma lo expuesto se elaboró la figura 17, la cual muestra las eficiencias obtenidas por el canal 2 B durante el Escenario 3, Escenario 1 (a) y (b), con sus respectivas radiaciones UV promedio.



**Figura 17: Eficiencia en eliminación de coliformes**

*Fuente: Elaboración propia*

Con la Figura 17 se puede presumir que a mayor radiación UV, mayor será la eficiencia en eliminación de coliformes.

Es importante señalar que la eficiencia obtenida con paneles reflectantes es mayor a los Esc. mencionados (99,7%), aun cuando durante esa experiencia se obtuvo una radiación UV promedio de 4,41 mW/cm<sup>2</sup>.

## 5. CAPITULO V: CONCLUSIONES

En base a los resultados y análisis presentados en el capítulo 4, las observaciones realizadas durante el proceso de investigación y los objetivos planteados, se determinan las siguientes conclusiones.

Se puede concluir que las consideraciones de diseño presentan incidencias relevantes en la mayoría de los casos.

Del Escenario 1 (a) y (b), en donde se buscaba evaluar el impacto de la geometría transversal y materialidad del canal, se observó que, para el caso de la geometría transversal; en el Escenario 1 (a), no se presentaron diferencias en la eficiencia final (84.6%), mientras que en el Escenario 1 (b), el canal trapecial (2 A) presentó una eficiencia de un 99,74 %, mientras que el canal rectangular (1 A) obtuvo un 93,4 % de eficiencia, siendo el canal 2 A un 6% mayor en eficiencia de eliminación de coliformes respecto al canal 1 A. Si bien no es una diferencia considerable, sin el uso de esta geometría no sería posible implementar paneles reflectantes, los cuales aumentaron significativamente las eficiencias de eliminación. Por otra parte, para el análisis de materialidad, el canal de acero galvanizado (2 A) obtuvo una eficiencia de un 99,74%, logrando ser un 9% mayor respecto al canal de acero inoxidable (2 B) (90,2 %). Por lo que se tiene que, el cambio de materialidad de acero galvanizado a acero inoxidable es poco categórica.

Es importante señalar que las eficiencias obtenidas al finalizar la experiencia tanto en el Escenario 1 (a) como en el 1 (b) fueron mayores al 84%.

Del Escenario 2, se puede concluir que, a mayor altura de la columna de agua, menor será la eficiencia en eliminación de coliformes, ya que se obtuvo un 99,4% en el caso de mayor volumen (160 l.) y un 99,7% (80 l.) para el caso de menor volumen. Si bien las eficiencias obtenidas al finalizar la experiencia difieren solo en un 0.3%, cifra poco relevante, se observó que, en el TRH<sub>2,3</sub> y <sub>4</sub> las eficiencias difieren hasta en un 16%. Por otro lado, los paneles reflectantes en el canal aumentaron considerablemente las eficiencias obtenidas en los distintos TRH, logrando una eficiencia final de un 99.7% en la eliminación de coliformes.

Del escenario 3, se desprende que a mayor radiación UV promedio, mayor es la eficiencia en la remoción de coliformes.

## 6. CAPITULO VI: REFERENCIAS

- AMEQA. (s.f.). *Investigacion de la ecotoxicología y la química ambiental*. Mexico : Asociación mesoamericana de ecotoxicología y química ambiental.
- Baca, M. (2012). *Tratamiento de los efluentes domésticos mediante humedales artificiales para el riego de áreas verdes en el distrito de San Juan de Marcona*. Perú: Tesis grado académico de maestro en investigación y docencia universitaria, Universidad nacional del Callao.
- Báez, J. (2004). *Ingeniería Ambiental. Sistema de recolección y evacuación de aguas residuales y pluviales*. Barranquilla.
- Benítez Rodas, G. A. (2013). *Análisis y modelización de la inactivación de Escherichia coli en aguas residuales*. Madrid: Memoria, Universidad Complutense de Madrid.
- CENTA. (2007). *Manual de tecnologías no convencionales para la depuración de aguas residuales. Centro de tecnologías del agua de sevilla* .
- CIDERH. (14 de Enero de 2017). *CIDERH. Centro de investigación y desarrollo en recursos hídricos* . Obtenido de <http://www.ciderh.cl/wp-content/uploads/2015/04/FICHA3.pdf>
- Gonzales, M. (22 de Diciembre de 2016). *Laguna de Maduración*. Obtenido de <http://www.tratamientodelagua.com.mx/lagunas-de-maduracion/>
- Meierhofer, R., & Wegelin, M. (2003). *Desinfección solar del agua "Guía de aplicación". Programa de agua y Saneamiento*.
- Metcalf & Eddy. (2003). *Ingeniería de aguas residuales tratamiento, vertido y reutilizacion*. Madrid: McGraw-Hill.
- Oakley, S. (2005). *Lagunas de estabilización en Honduras; manual, diseño, construcción, operación y mantenimiento, monitoreo y sostenibilidad*. Honduras: Red Regional de Agua y Saneamiento de centro america.
- OMS. (2008). *Guías para la calidad del agua potable*. Ginebra.

Organización Panamericana de la Salud. (2005). *Guía para el mejoramiento de la calidad del agua a nivel casero*. Lima.

Painter, H. (1979). *Chemical, physical and biological characteristics of water effluents*. New York.

Ramalho, R. S. (1998). *Tratamiento de aguas residuales*. Barcelona, España: Reverté, S.A.

Romero Tous, M. (2009). *Energía solar térmica*. Barcelona, España: CEAC.

Tipler, P., & Mosca, G. (2003). *Física para la ciencia y la tecnología Vol 2B*. Reverté.

Von Sperling, M. (2007). *Biological Wastewater Treatment. Volume 1: Wastewater characteristics treatment and disposal*. London: IWA publishing.

## **7. ANEXOS**

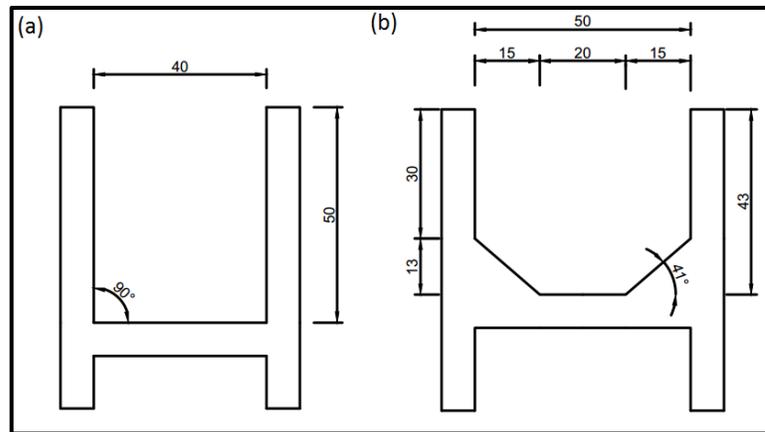
## ANEXO A. CONSTRUCCIÓN CANALES

### a) Diseño de los canales

La elección del diseño se basa en una estructura simple y de bajo costo, con una materialidad que permita la reflexión de la radiación solar para aumentar la eficiencia en la eliminación de coliformes.

- Sección transversal

Los canales se diseñaron con distinta sección transversal, rectangular y trapecial, para analizar el efecto de la geometría en la eliminación de coliformes. El canal de sección transversal rectangular será denominado “canal 1 A” (Figura A1.a), mientras que el canal de sección trapecial será denominado “canal 2 A” (Figura A1. b). Las dimensiones están detalladas en la Figura A1.

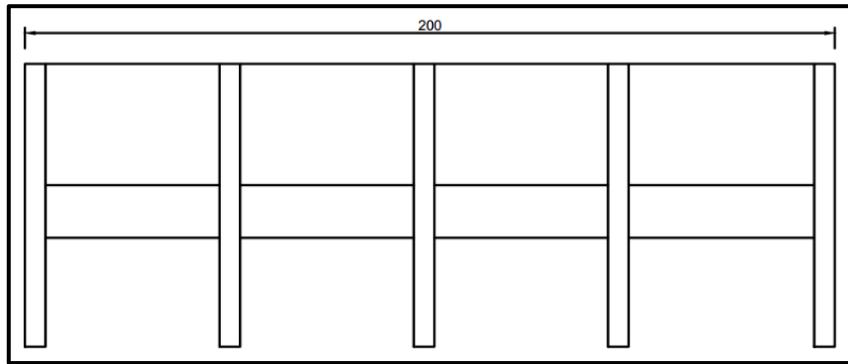


**Figura A1: Sección transversal de canales.**

*Fuente: Ortiz, 2016.*

- Sección longitudinal

La sección longitudinal es la misma para los dos canales, los cuales cuentan con una longitud de 2 metros. Las dimensiones se detallan en la Figura A2.



**Figura A2: Sección longitudinal de canales.**

*Fuente: Ortiz, 2016.*

b) Componentes de los canales

- Estructura de madera.

Los canales son soportados por cinco estructuras de madera tipo marcos, los que están separados a una distancia de 50 cm, obteniendo así un largo total de 2 metros por canal. Los marcos están contruidos con secciones de pino en bruto de 2x3 pulgadas y unidos por secciones de OSB de 9,5 mm y por tablas de 1x4 pulgadas, las que arriostran la estructura y proporcionan el soporte para las cargas producto del peso del agua presente en los canales. Cada uno de los marcos asigna la geometría requerida. El “canal 1 A” de sección transversal rectangular y el “canal 2 A” de sección trapecial, ver Figura A3.



**Figura A3: Cuerpo principal de los canales.**

*Fuente: Elaboración propia.*

- Material reflectante

El material reflectante elegido por Ortiz (2016) para el canal 1 A y 2 A fue acero galvanizado de 0,35x1000x2000 mm (Figura A4). Este material fue elegido, debido a su bajo costo, durabilidad, tolerancia al contacto con el agua y su capacidad de reflexión de radiación solar.



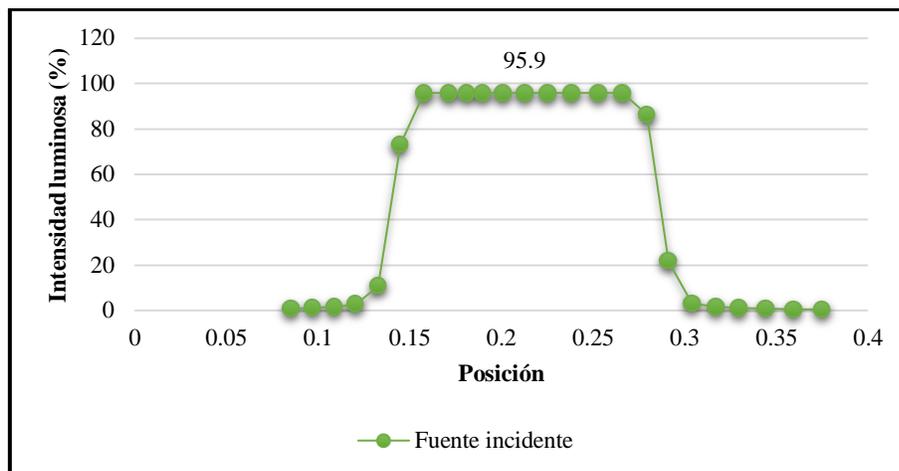
**Figura A4: Canales con superficie reflectante.**

*Fuente: Elaboración propia.*

- Llaves de paso.

En la salida de los canales se instala una llave de paso de PVC tipo bola o jardín. Esta llave se instala con el objeto de retirar el agua residual utilizada en la etapa experimental y así poder verterla en una cámara sanitaria contigua a los canales.

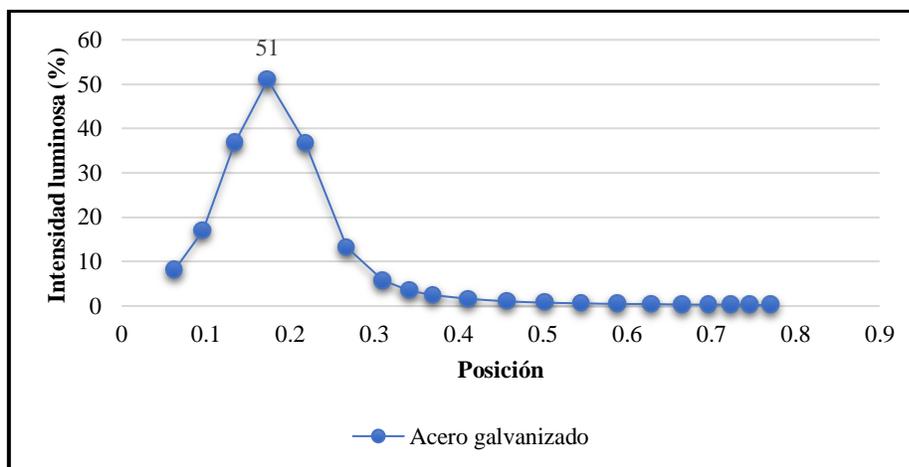
**ANEXO B. RESULTADOS ANÁLISIS DE REFLEXIÓN DE INTENSIDAD LUMINOSA**



**Figura B1: Análisis de reflexión de intensidad luminosa**

*Fuente: Elaboración propia.*

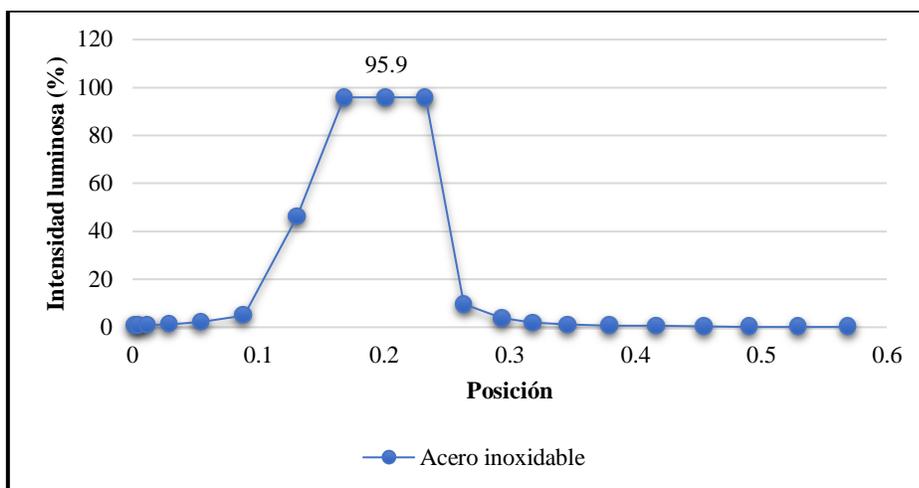
La fuente incidente arroja una intensidad de la luz igual a 95.9%.



**Figura B2: Análisis de reflexión de intensidad luminosa**

*Fuente: Elaboración propia.*

Sobre una base de un 95.9% el acero galvanizado refleja un 51%, concentrando el haz de luz en un solo punto, debido a posibles curvaturas en el material.



**Figura B4: Análisis de reflexión de intensidad luminosa**

*Fuente: Elaboración propia.*

Sobre una base de un 95.9% el acero inoxidable mantiene la intensidad, pero con una amplitud menor, ya que concentro el haz de luz.

## ANEXO C. REGISTRO FOTOGRAFICO



**Figura C1: Cuerpo principal del canal 2 B.**

*Fuente: Elaboración propia.*



**Figura C2: Canal 2 B con superficie reflectante.**

*Fuente: Elaboración propia.*



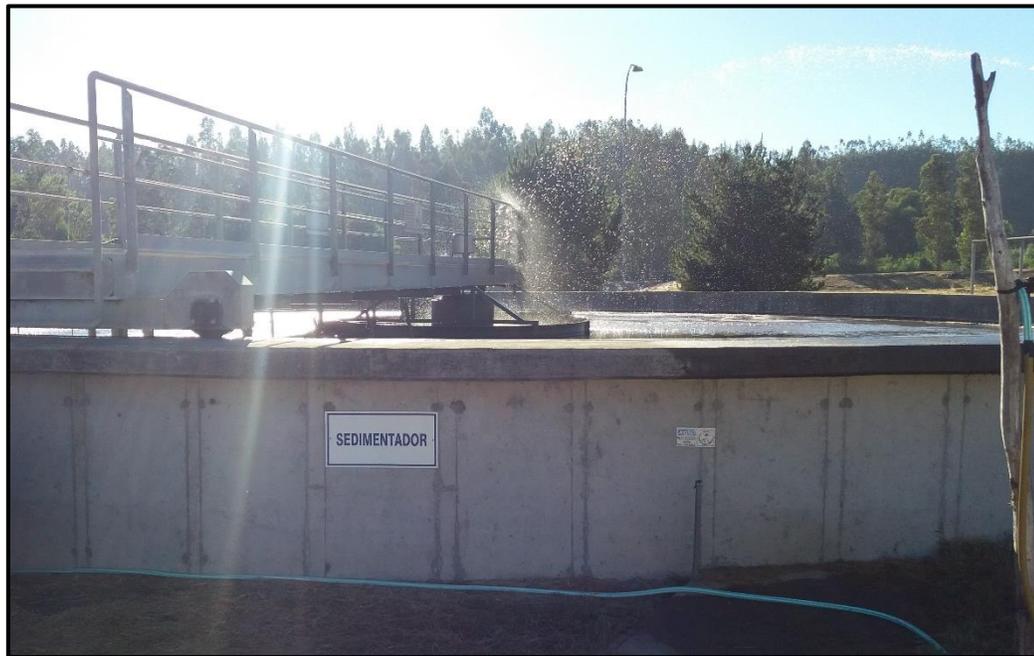
**Figura C3: Instalación de paneles reflectantes**

*Fuente: Elaboración propia.*



**Figura C4: Medidor de radiación ultravioleta**

*Fuente: Elaboración propia.*



**Figura C5: Sedimentador de donde se extrajo el agua residual**

*Fuente: Elaboración propia.*



**Figura C6: Operación de canales.**

*Fuente: Elaboración propia.*



**Figura C7: Toma de muestras**

*Fuente: Elaboración propia.*

## ANEXO D. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS MEDIDOR DE RADIACIÓN ULTRAVIOLETA

ESPECIFICACIONES TECNICAS	
Monitor	Tamaño LCD: 28 x 19 mm
Espectro sensor UV	Paso de banda de 260 nm a 390 nm
Rangos de medición y resolución	rango 1: 2000 uW/cm <sup>2</sup> : 1999 uW/cm <sup>2</sup> x 1 uW/cm <sup>2</sup> rango 2: 20 mW/cm <sup>2</sup> : 19.99 mW/cm <sup>2</sup> x 1 mW/cm <sup>2</sup>
Precisión	(4% de lo leído +2 dig.) - La calibración se ejecuta bajo la luz UVA y se compara con el medidor de luz estándar UVA - Probado bajo un ambiente de intensidad de campo de referencia inferior a 3 V/M y la frecuencia de menos de solo 30 MHz
Estructura sensor	foto sensor UV con filtro de corrección del coseno
Circuito	Microprocesador de un chip personalizado con circuito de integración de gran escala (LSI)
Botones	Botón de encendido, botón de pausa, botón de registro
Tiempo de muestra	1 segundo aprox.
Apagado	Apagado automático ahorra vida de la batería
Peso	190 g/ 0.2 LB
temperatura de funcionamiento	0°C a 50°C
Humedad de funcionamiento	menos de 85% H.R.
Fuente de alimentación	4 pilas AAA
Consumo de energía	Corriente continua de aproximadamente 5.5 mA
Dimensiones	210 x 49 x 40 mm
accesorios	Manual de instrucciones.... 1PC