

Universidad del Bío-Bío  
Facultad de Ingeniería  
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

Profesor Patrocinante: Dr. Pedro Cisterna Osorio



**“EVALUACIÓN DEL AUMENTO DE LA RADIACIÓN ULTRAVIOLETA  
NETA EN CANAL METÁLICO, CON ASISTENCIA DE PANELES Y  
ALETAS LATERALES REFLECTANTES”**

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

RODRIGO EDUARDO PEIRANO CUEVAS

Concepción, agosto 2018

## **NOMENCLATURA**

### Unidades de medida

- $\text{mW}/\text{cm}^2$ : milivatio/centímetro cuadrado.
- $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ : microvatio/centímetro cuadrado.
- nm: nanómetro.
- nmp/100mL: número más probable/100 mililitros.
- L: litro.
- cm: centímetros.

### Siglas

- TRH: tiempo de residencia hidráulico.

### Abreviaturas

- UV: ultravioleta.

## INDICE GENERAL

1. CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN .....	3
1.1. Justificación.....	5
1.2. Alcance de la investigación.....	6
1.3. Objetivo general .....	7
1.4. Objetivos específicos.....	7
2. CAPITULO II: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	8
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.....	13
2.2. Tratamiento de aguas residuales .....	15
2.2.1. <i>Fases de tratamiento de aguas residuales</i> .....	15
2.2.2. <i>Tecnologías blandas de tratamiento de aguas residuales</i> .....	16
2.2.3. <i>Desinfección</i> .....	17
2.2.4. <i>Tecnologías convencionales de desinfección de aguas residuales</i> .....	18
2.3. Reflexión y refracción.....	21
3. CAPITULO III: METODOLOGIA .....	23
3.1. Selección del sitio .....	23
3.2. Materiales y equipos utilizados .....	23
3.2.1. <i>Canales</i> .....	23
3.2.2. <i>Paneles reflectantes</i> .....	23
3.2.3. <i>Aletas reflectantes laterales</i> .....	24
3.2.4. <i>Medidor de radiación ultravioleta</i> .....	25
3.3. Procedimiento .....	25
3.3.1. <i>Escenario 1</i> .....	25
3.3.2. <i>Escenario 2</i> .....	26
3.3.3. <i>Escenario 3</i> .....	27
4. CAPITULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	29
4.1. Análisis de resultados Escenario 1 .....	29

4.1.1. <i>Análisis de malla de radiación ultravioleta sin paneles y sin aletas</i> .....	30
4.2. <i>Análisis de resultados Escenario 2</i> .....	33
4.2.1. <i>Análisis de malla de radiación ultravioleta con paneles y sin aletas</i> .....	35
4.2.2. <i>Análisis de malla de radiación ultravioleta con paneles y aletas</i> .....	36
4.2.3. <i>Análisis de malla de radiación ultravioleta aletas y paneles a diferente altura</i> .....	39
4.3. <i>Análisis de resultados Escenario 3</i> .....	43
4.3.1. <i>Análisis de resultados de coliformes totales y coliformes fecales de laboratorio</i> .....	44
5. CAPITULO V: CONCLUSIONES .....	45
6. CAPITULO VI: REFERENCIAS .....	46
7. ANEXOS.....	48
ANEXO A. CONSTRUCCIÓN CANAL .....	49
ANEXO B. REGISTRO FOTOGRÁFICO.....	52
ANEXO D. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS MEDIDOR DE RADIACIÓN ULTRAVIOLETA ...	55

# **EVALUACIÓN DEL AUMENTO DE LA RADIACIÓN ULTRAVIOLETA NETA EN CANAL METÁLICO, CON ASISTENCIA DE PANELES Y ALETAS LATERALES REFLECTANTES**

Autor: Rodrigo Peirano Cuevas

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío Bío

Correo electrónico: [r.peirano.cuevas@gmail.com](mailto:r.peirano.cuevas@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, como componente esencial para la vida hace de su tratamiento un proceso fundamental para evitar las infecciones transmitidas por la contaminación este recurso. El uso de la radiación ultravioleta como tratamiento desinfectante de aguas residuales tratadas logra añadir una alternativa menos contaminante, frente a los masivamente utilizados tratamientos químicos, como en el caso del cloro.

Este trabajo de investigación busca evaluar la incidencia de la adición de aletas y paneles reflectantes sobre un canal metálico de sección trapezoidal, en el aumento de la radiación ultravioleta de origen natural; Además, busca verificar la disminución de coliformes fecales y coliformes totales para diferentes tiempos de residencia hidráulicos con afluente proveniente de Humedal Artificial; todo esto con el objetivo de aportar con una alternativa económica y ambientalmente sostenible, ampliando así los usos de la reutilización de las aguas tratadas.

Los resultados indican que el aporte de las aletas y paneles reflectantes logran aumentar considerablemente la radiación promedio resultante dentro del canal, respecto a la radiación promedio del ambiente. Además, se logró disminuir los niveles de coliformes totales y coliformes fecales por debajo del límite de usos de agua para riego, de acuerdo al DS90, según la normativa vigente en Chile.

Palabras clave: Coliformes, Desinfección, Radiación ultravioleta

# **EVALUATION OF NET ULTRAVIOLET RADIATION INCREASE IN METALLIC CHANNEL, WITH LATERAL REFLECTING PANELS AND LATERAL REFLECTING WING ASSISTANCE**

Author: Rodrigo Peirano Cuevas

Department of Civil and Environmental Engineering, University of Bío Bío

Email: [r.peirano.cuevas@gmail.com](mailto:r.peirano.cuevas@gmail.com)

Professor Guide: Pedro Cisterna Osorio

Department of Civil and Environmental Engineering, University of Bío Bío

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

## **ABSTRACT**

Water, as an essential component for life, it makes its treatment a fundamental process to avoid infections transmitted by pollution this resource. The use of ultraviolet radiation as a disinfectant treatment of treated wastewater manages to add a less polluting alternative, compared to the massively used chemical treatments, as in the case of chlorine.

This research work seeks to evaluate the incidence of the addition of fins and reflective panels on a trapezoidal metal channel, in the increase of ultraviolet radiation of natural origin; In addition, it seeks to verify the decrease of fecal coliforms and total coliforms for different periods of hydraulic residence with tributary from Artificial Wetland; all this with the aim of providing an economically and environmentally sustainable alternative, thus expanding the uses of the reuse of treated water.

The results indicate that the contribution of the fins and reflective panels manage to considerably increase the average radiation resulting within the channel, with respect to the average radiation of the environment. In addition, it was possible to reduce the levels of total coliforms and fecal coliforms below the limit of water uses for irrigation, according to the DS90, pursuant to the regulations in force in Chile.

Key words: Coliforms, Disinfection, UV radiation.

## 1. CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

La superficie terrestre está cubierta en un 74,51% por agua, lo que comprende un 70,8% por los océanos, un 3,4% por los casquetes polares y glaciares, un 0,17% por lagos de agua dulce natural y un 0,14% por lagos salinos naturales, (Nace, 1960). Del total de agua disponible en nuestro planeta, menos del 3% corresponde a agua dulce, es decir apta para el consumo humano, y gran parte de esta agua está almacenada en los glaciares y casquetes polares, o en zonas subterráneas económicamente inaccesibles (Hernández, 2010).

El acceso al agua potable en suficiente cantidad y de buena calidad es una necesidad humana básica. La Organización de Naciones Unidas (ONU) considera el acceso al agua limpia como un derecho básico de la humanidad, y como un paso indispensable hacia la mejoría de los estándares de calidad de vida (Resolución A/RES/64/292, 2010).

Por otro lado, la generación de aguas servidas es una consecuencia inevitable de las actividades humanas, estas modifican las características fisicoquímicas y biológicas del agua de partida, contaminándola o restringiendo su posterior aplicación para otros usos. La escasez cada vez mayor de las aguas dulces ha dado lugar al uso creciente de aguas residuales para la agricultura, la acuicultura, la recarga de aguas subterráneas y otras áreas. En algunos casos, las aguas residuales son el único recurso hídrico de las comunidades pobres que subsisten por medio de la agricultura. Esta contaminación, ya sea por el uso directo de aguas contaminadas o por el uso de estas aguas para el riego de cultivos, generan altas tasas de enfermedades, provocadas por agentes patógenos presentes.

En cualquier momento, cerca de la mitad de los habitantes de los países en vías de desarrollo sufren problemas de salud provocados por unos deficientes servicios de agua y saneamiento. Juntos, el agua sucia y un saneamiento deficiente, son la segunda mayor causa de muerte infantil en el mundo. Se calcula que se pierden 443 millones de días escolares al año debido a enfermedades relacionadas con el agua (ibídem).

El tratamiento de aguas servidas busca producir un efluente reutilizable en el ambiente y un residuo sólido, fango o biosólido, conveniente para su disposición o reutilización.

Es necesario buscar procesos de tratamiento económicos y fiables que permitan obtener un agua residual apta para un uso específico (Painter, 1979).

Los tratamientos para las aguas residuales pueden reconocerse en base a su ubicación en el proceso de limpieza, como primarios, secundarios y terciarios.

Los sistemas de tratamiento primario son los más sencillos en la limpieza del agua y tienen la función de preparar el agua, limpiándola de todas aquellas partículas cuyas dimensiones puedan obstruir o dificultar los procesos consecuentes (Rodie y Hardenberg, 1987). Estos tratamientos consisten en la utilización de mallas o barreras, la floculación o eliminación de las grasas y aceites y la sedimentación.

El tratamiento secundario tiene el objetivo de limpiar el agua de aquellas impurezas cuyo tamaño es mucho menor a las que se pueden captar por la decantación y las rejillas, para ello, los sistemas se basan en métodos mecánicos y biológicos combinados (Rodie y Hardenberg, 1987). Dentro de los métodos de tratamiento secundario se encuentran las plantas de lodos activados, sistemas de percolación, sistemas de tratamiento anaeróbicos, humedales artificiales, entre otros métodos.

La tercera etapa del tratamiento tiene como objetivo desinfectar las aguas ya tratadas primaria y secundariamente, para dar fin la materia orgánica residual, nutrientes y patógenos, que los procesos primario y secundario no son capaces de eliminar. En este proceso, el desinfectante más usado a nivel nacional, y mundial, es el cloro, en cuyo proceso de desinfección no sólo se produce la inactivación de los patógenos, sino que además, proceden reacciones de oxidación con la materia orgánica disuelta en la matriz de agua. Estas reacciones generan compuestos no deseados que se denominan subproductos de desinfección, entre los cuales se destacan con mayor frecuencia y concentración los trihalometanos (THMs) y los ácidos haloacéticos (HAA s). Entre los THMs se incluyen el cloroformo, bromodiclorometano, dibromoclorometano y bromoformo. . Los subproductos de desinfección han recibido mayor atención en el proceso de potabilización de agua, donde las personas que están expuestas a dosis de trihalometanos totales en exceso a los niveles indicados por la normativa NC h409 podrían experimentar a largo plazo problemas en el hígado, los riñones o en el sistema nervioso central y un mayor riesgo de cáncer. Los subproductos de desinfección generados en tratamiento de aguas servidas pueden ser tóxicos para los organismos acuáticos. Whatson et al. (2012), observó un aumento de la toxicidad general de los subproductos de desinfección generados en efluentes residuales, usando un ensayo de bioluminiscencia in vitro, concluyendo que los subproductos de desinfección producidos al



clorar aguas residuales pueden ser tóxicos y pueden tener un impacto perjudicial sobre los organismos acuáticos que están expuestos a ellos.

Como alternativa de desinfección se ha comenzado a utilizar la radiación ultravioleta artificial y natural, presentando muy buenos resultados de inactivación de patógenos y con la gran ventaja de no generar subproductos de desinfección en el proceso.

### 1.1. Justificación

La ONU establece que la cantidad mínima de acceso a agua potable para cada habitante debería ser entre 50 y 100 litros (Resolución A/RES/64/292, 2010), lo que lamentablemente no se cumple para todos los habitantes del planeta, existiendo aún 884 millones de personas que viven a más de 1 kilómetro de una fuente de agua, las cuales tienen un uso normalmente inferior a 5 litros de un agua insalubre (PNUD, 2006).

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, mirado desde una perspectiva rápida, puede considerarse económico por el costo del insumo, pero debido a los riesgos de manipulación requiere empleo de equipo de seguridad adecuado y procedimientos sofisticados que solo lo hacen práctico a gran escala. Sin embargo, una de las principales desventajas del uso del cloro como desinfectante de aguas residuales tratadas es la generación de SPD, compuestos organoclorados, que se forman cuando la materia orgánica entra en contacto con el cloro, dentro de los cuales están los trihalometanos, de comprobada toxicidad para el ser humano.

Debido a lo anterior, 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 no convencionales ya existentes, como es el caso de los humedales. Es así, que la radiación ultravioleta natural, junto a su poder germicida, brinda una alternativa de depuración efectiva, sin generar subproductos de desinfección.

## 1.2. Alcance de la investigación

Esta investigación busca evaluar el aumento de la radiación ultravioleta, de origen solar, dentro de un canal de geometría trapezoidal, de acero inoxidable, al que se le añaden paneles laterales de altura adaptable y aletas laterales, ambos cubiertos con materiales que permiten la reflexión. Este sistema está emplazado a la salida del Humedal de flujo subsuperficial instalado en las dependencias de Aldeas SOS, en la comuna de Bulnes. Una vez realizada la conexión, se realiza la medición de radiación ultravioleta dentro del canal, mediante una malla de puntos, lo que permite obtener puntos particulares de concentración de radiación dentro del canal y obtener un promedio de radiación dentro y fuera del canal, todo esto para diferentes alturas de paneles reflectantes. A partir de esta experiencia se realiza un análisis comparativo para determinar la incidencia de la altura de los paneles en la eficiencia de reflexión de radiación ultravioleta natural en el canal. Por otro lado, se regula el afluente para el ingreso de distintos caudales, con el fin de realizar muestras que permitan obtener una perspectiva de desinfección para diferentes tiempos de residencia hidráulicos (TRH), pudiendo contrastar de manera inicial los rendimientos de eliminación de coliformes.

### 1.3. Objetivo general

Evaluar el aumento de la radiación ultravioleta neta en canales metálicos, con asistencia de paneles y aletas laterales reflectores.

### 1.4. Objetivos específicos

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

- a) Evaluar la radiación ultravioleta promedio resultante en el sistema desinfectante.
- b) Evaluar el impacto de los paneles reflectantes en la radiación promedio resultante en el canal.
- c) Evaluar el impacto de la altura de los paneles reflectantes en la radiación promedio resultante en el canal.
- d) Evaluar el impacto de las aletas reflectantes laterales en la radiación promedio resultante en el canal.
- e) Determinar o medir la eliminación de coliformes fecales y coliformes totales para distintos tiempos de residencia hidráulico (TRH) en sistema de desinfección.

## 2. CAPITULO II: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

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 domésticas o urbanas, aguas residuales industriales, escorrentías de usos agrícolas, pluviales (Ramalho, 1998).

##### a) Aguas residuales domésticas

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**

Constituyentes	Razones de interés
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	1·10 <sup>3</sup> -1,8·10 <sup>8</sup>	1·10 <sup>6</sup> -1·10 <sup>10</sup>

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.

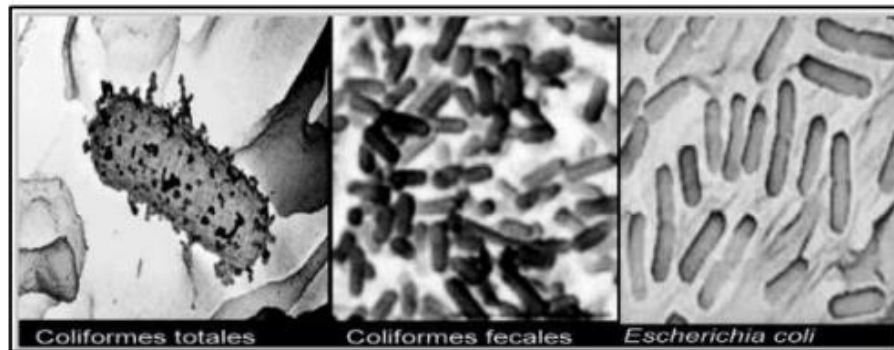
Estos coliformes son eliminados a través de las heces humanas en números altos, pero no todos ellos son de origen fecal. Estos indicadores son muy útiles para determinar la calidad del agua. Ellos son menos sensibles que los virus y quistes de protozoos a factores de estrés ambientales y tratamientos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

##### b) Coliformes fecales

Dentro de la clasificación de coliformes totales se encuentran los coliformes fecales o coliformes termotolerantes, que 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).

c) *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).



**Figura 1: Bacterias coliformes.**

*Fuente: Desinfección SODIS*

**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*

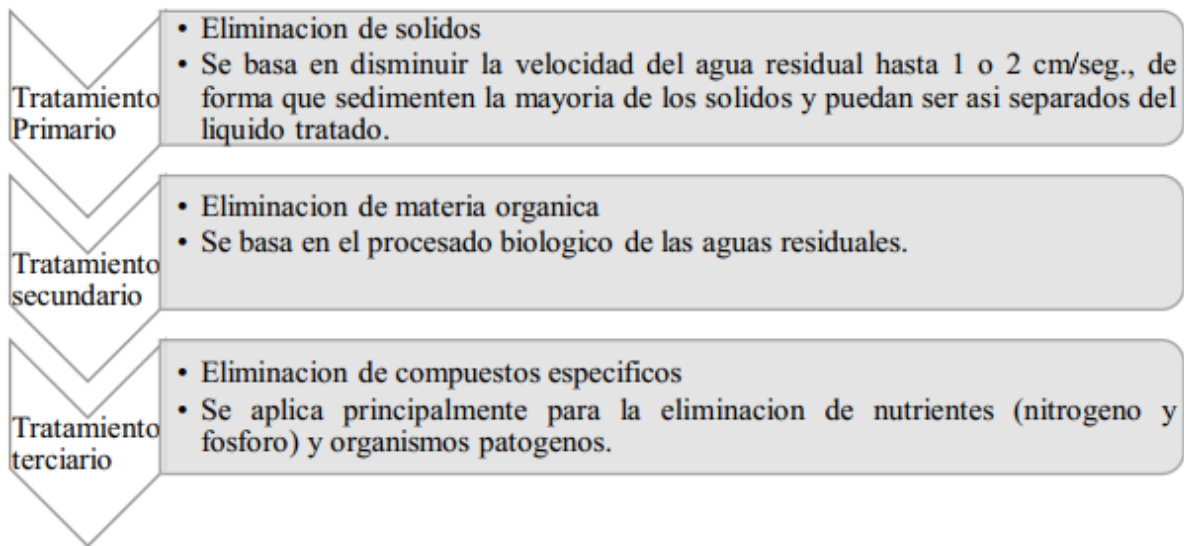
## 2.2. Tratamiento de aguas residuales

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. 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, eneas 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.**

#### 2.2.3. 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).

#### *2.2.4. 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)

#### b) Radiación solar ultravioleta

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.

### *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 hidrógeno). 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  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ .

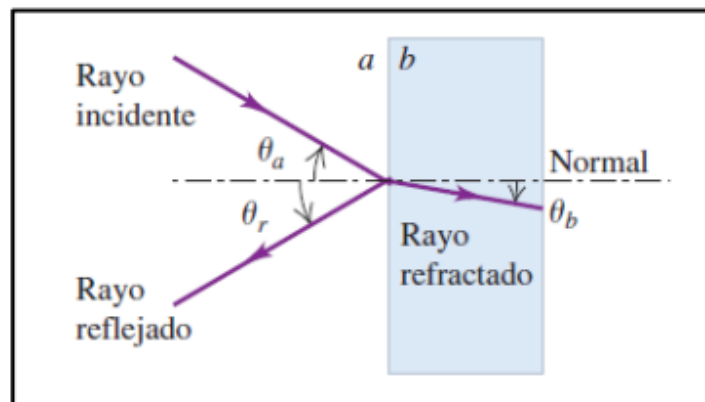
- Tiempo de exposición

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. Reflexión y refracción.

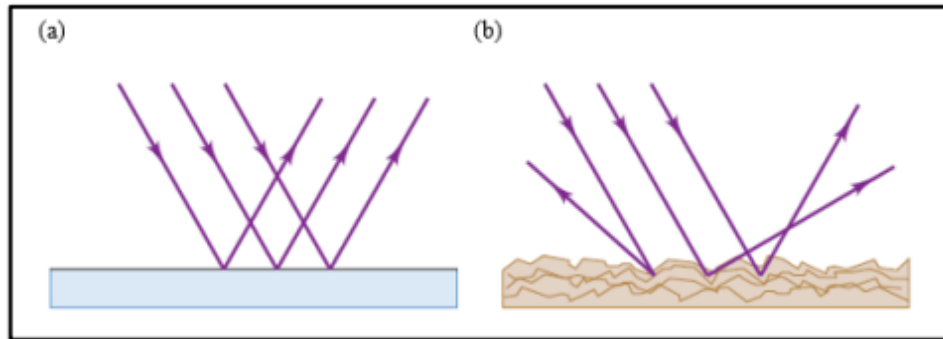
Cuando una onda luminosa incide en una interfaz lisa que separa dos materiales transparentes, la onda en general es reflejada parcialmente y también refractada (transmitida) parcialmente hacia el segundo material. A medida que un rayo pasa a través del material, parte de este puede ser absorbida, con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

Se describen las direcciones de los rayos incidente, reflejado y refractado en una interfaz lisa entre dos materiales ópticos en términos de los ángulos que forman con respecto a una recta imaginaria 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, Ec. (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 los 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 Ec. (2):

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

### 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 Aldeas SOS, ubicada en la comuna de Bulnes. El sitio utilizado fue seleccionado según los siguientes criterios y consideraciones: contar un terreno disponible suficiente para la instalación del canal, con acceso inmediato y continuo al efluente del Humedal de flujo subsuperficial para tratamiento de las aguas servidas instalado en las mismas dependencias; ser un terreno despejado donde no exista sombra que interfiera con los canales de 10:00 a 18:00 h; con acceso a una red de agua cercana para el lavado del canal, paneles y aletas, 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 utilizó un canal de paredes reflectantes, con el objetivo de contener los rayos solares por mayor tiempo actuando en el cuerpo de agua (figura 6). El canal fue diseñado y construido por Ruiz (2017), cuya sección transversal es de tipo trapezoidal, y el material reflectante utilizado para las paredes fue de acero inoxidable, debido a que este presenta un 100% de reflexión en relación a la luz incidente (Ruiz, 2017). Las consideraciones constructivas están incluidas en el Anexo A.

##### 3.2.2. Paneles reflectantes

Con el propósito de lograr una mayor eficiencia en la multiplicación de la reflexión de la radiación solar es que se evaluará el aporte de paneles reflectantes en el canal, como se ilustra en la figura 6, ubicándolos a diferentes alturas.

##### 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  $51^\circ$  con respecto a la horizontal, de manera que estos puedan aportar la mayor área posible de reflexión desde y hacia el interior del canal, ver figura A1.

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 200x5x40 cm.

- Material reflectante

Para construir los paneles reflectantes se utilizará acero galvanizado.

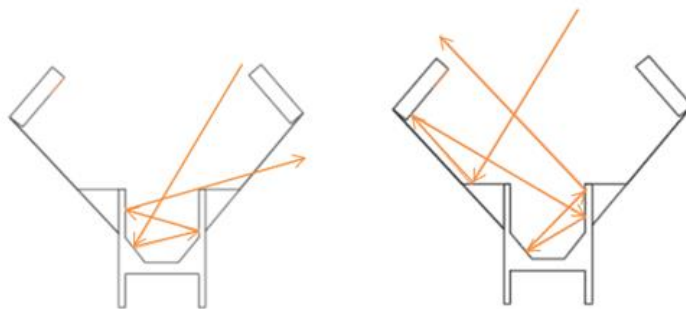
### 3.2.3. Aletas reflectantes laterales

Con el objetivo de aumentar el área aportante de radiación, es que se agregarán aletas reflectantes laterales, las que permitirán reflejar alguna cantidad de rayos que no incidan directamente en el canal y que sean reflejadas hacia los paneles y luego hacia dentro del canal.

a) Diseño de las aletas

Utilizando los mismos criterios anteriores, se utilizó un material de bajo costo y una implementación simple y funcional, lo que permita una reflexión de la radiación ultravioleta solar.

Las aletas se instalan en la boca del canal, ancladas a la estructura de madera, con una leve inclinación, cercana al 5%, de tal manera que parte de la radiación proveniente del sol sea reflejada primeramente a los paneles y luego hacia dentro del canal, tal como se indica en la figura 6.



**Figura 6: Reflexión de la radiación en el sistema.**

*Elaboración propia*

#### 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 B5, 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 previamente tratada, mediante tratamiento secundario, desde el Humedal de flujo subsuperficial ubicado en las dependencias de las Aldeas SOS, ubicada en la comuna de Bulnes.

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

Busca evaluar la radiación promedio resultante en el canal desinfectante a partir de la radiación proveniente únicamente del ambiente, respondiendo de esta manera, al objetivo específico a). Este escenario se realizó inhabilitando los paneles y aletas laterales, midiendo, con el instrumento lector, la radiación ultravioleta a una altura igual a la que alcanza la superficie del agua dentro del canal (Sistema 1A).

Para la realización de este escenario se realizaron dos mediciones y establecieron las siguientes definiciones:

##### a) Orientación del canal

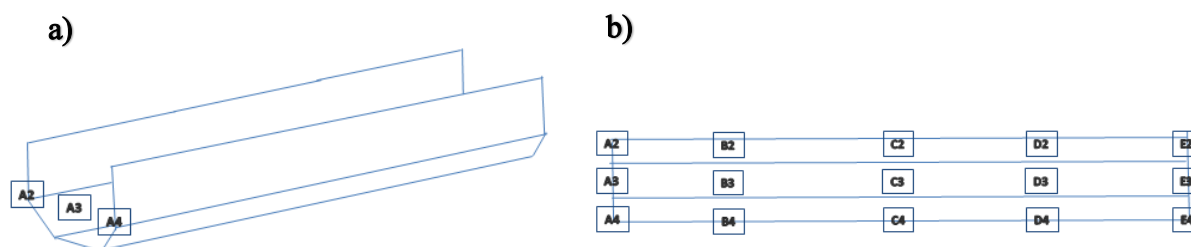
El canal se instaló en la zona definida, a la salida del humedal, con una disposición de salida del efluente en dirección NNE, de 19 grados, aproximadamente.

##### b) Altura de la columna de agua

La altura de la columna de agua definida para el canal es, en promedio, de 19.8 centímetros; permitiendo un volumen constante de 151 litros, aproximadamente.

##### c) Malla de puntos de radiación

La medición de radiación ultravioleta dentro del canal se realizó mediante una malla de puntos, de la manera señalada en las figuras (7.a) y (7.b), vista isométrica y en planta respectivamente, con el instrumento lector señalado en el punto 3.2.4.



**Figura 7: Diagrama malla de puntos.**

*Elaboración propia*

**3.3.2. Escenario 2**

Tiene como objetivo evaluar el impacto de los paneles reflectantes en la radiación promedio resultante dentro del canal a partir únicamente de la radiación proveniente desde el sol, de manera natural, dando respuesta al objetivo b). Para este escenario se habilitaron los paneles laterales y se mantuvieron inhabilitadas las aletas (sistema 2A), midiendo la radiación ultravioleta a una altura igual a la señalada en el punto anterior. Así mismo, se habilitarán las aletas laterales (sistema 2B) para evaluar su impacto en la radiación promedio resultante dentro del canal, dando respuesta al objetivo c). Por último, se ubicarán los paneles a diferentes alturas, con el sistema completo (sistema 2C), para evaluar el impacto provocado dentro de la radiación promedio dentro del canal, para responder el objetivo d). Las distintas características del sistema que se utilizaron para completar los objetivos mencionados se representan en el siguiente cuadro, tabla 4:

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

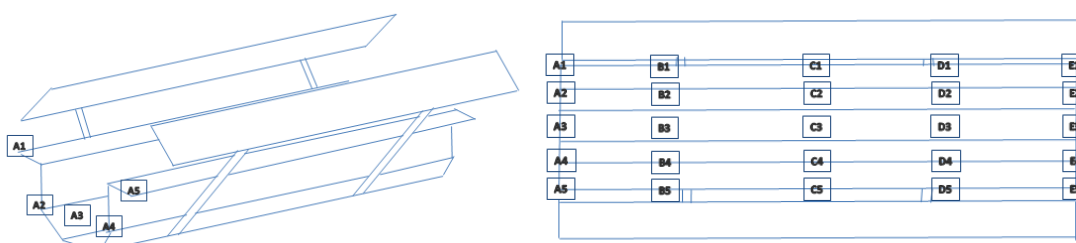
Características	2A	2 B	2C
Características	Canal reflectante y paneles reflectantes	Canal reflectante, paneles reflectantes y aletas reflectantes	Canal reflectante, aletas reflectantes y paneles reflecatantes a distintas alturas

*Fuente: Elaboración propia*

Para la realización del escenario 2 se establecieron las mismas definiciones que para el escenario 1, con una modificación en la malla de puntos de radiación, para obtener una visión más amplia de lo que sucede en el sistema, esta modificación se explica a continuación:

a) Malla de puntos de radiación

La medición de radiación ultravioleta dentro del canal se realizó mediante una malla de puntos, de la manera señalada en las figuras (8.a) y (8.b), vista isométrica y en planta respectivamente, con el instrumento lector señalado en el punto 3.2.4.



**Figura 8: Diagrama malla de puntos.**

*Elaboración propia*

El formato de tabulación de datos a utilizar en las tablas de resultados tendrá la forma mostrada en la tabla 5, a continuación:

Formato de relleno de malla de radiación UV				
A1	B1	C1	D1	E1
A2	B2	C2	D2	E2
A3	B3	C3	D3	E3
A4	B4	C4	D4	E4
A5	B5	C5	D5	E5
Radiación ambiente: (mW/cm <sup>2</sup> )				
Radiación promedio: (mW/cm <sup>2</sup> )				

**Tabla 5: Formato de tabulación de datos de radiación UV**

*Fuente: Elaboración propia.*

3.3.3. Escenario 3

Este escenario busca medir la eliminación de coliformes fecales y coliformes totales para distintos tiempos de residencia hidráulicos en el sistema de desinfección. Para esto, se utilizó el sistema completo (canal, paneles y aletas reflectantes), en distintos días y con diferentes radiaciones ambiente. La alimentación del afluente se realizó con flujo constante, proveniente de la salida del tratamiento del humedal de flujo subsuperficial.

a) Altura de la columna de agua

La altura de la columna de agua definida para el canal es, en promedio, de 19.8 centímetros; permitiendo un volumen constante de 151 litros, aproximadamente.

b) Tiempo de residencia hidráulico

Para la experiencia se contemplaron el mínimo de TRH necesarios para dar cumplimiento al DS90, que indica el nivel de coliformes aceptable para utilizar las aguas tratadas para distintos tipos de riego. De acuerdo a lo anterior, se emplearon los siguientes TRH:

TRH Escenario 3:

- TRH<sub>1</sub>=20 min
- TRH<sub>2</sub>=30 min
- TRH<sub>3</sub>=40 min
- TRH<sub>4</sub>=60 min
- TRH<sub>5</sub>=90 min

c) Operación de los canales

Los canales son alimentados con agua residual tratada, proveniente del Humedal de flujo subsuperficial, de manera constante, por lo que el tiempo de residencia hidráulico se fijó mediante un aforo y determinación del caudal necesario según el volumen de agua disponible dentro del canal, expuesto a la radiación solar.

d) Toma de muestras

La toma de muestras se realiza de la misma manera para todos los TRH. La primera muestra es tomada al inicio del sistema y en el tiempo cero, utilizando un frasco de 250 ml entregado por el laboratorio LECYCA, de la Universidad del Bío-Bío, con el objetivo de obtener los niveles de desinfección antes del paso por el sistema. Las siguientes muestras se toman según el tiempo de residencia correspondiente, sumergiendo el recipiente tapado entre 5 y 10 cm y abriendo el frasco al interior del agua, permitiendo que se llene, sacando el frasco con la muestra correspondiente.



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 de cada día de lectura, se procede a enviar los frascos para su posterior análisis en el laboratorio LECYCA.

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

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos de las mediciones de las mallas de puntos mediante el instrumento lector y las mediciones de eliminación de coliformes obtenidos, los cuales fueron entregados por el laboratorio LECYCA, de la Universidad del Bío-Bío.

##### 4.1. Análisis de resultados Escenario 1

Este escenario buscaba dar respuesta al objetivo propuesto a), los que tienen relación con evaluar la radiación promedio resultante en el canal desinfectante a partir de la radiación proveniente únicamente del ambiente.

Los datos obtenidos en esta primera experiencia se exponen a continuación, en las tablas 6 y 7:

**Tabla 6: Resultado de malla de radiación Escenario 1**

Malla radiación ultravioleta sin paneles y sin aletas (mW/cm <sup>2</sup> )				
5,08	4,78	4,66	4,42	4,87
5,23	4,70	4,87	4,44	4,96
4,88	4,60	4,85	4,16	4,77
Radiación ambiente: 5,44(mW/cm <sup>2</sup> )				
Radiación promedio en el canal: 4,75(mW/cm <sup>2</sup> )				

*Fuente: Elaboración propia*

**Tabla 7: Resultado de malla de radiación Escenario 1**

Malla radiación ultravioleta sin paneles y sin aletas				
6,45	4,49	4,90	4,98	4,82
4,97	4,51	4,68	4,92	5,02
4,70	4,47	4,38	4,63	4,72
Radiación ambiente: 5,42(mW/cm <sup>2</sup> )				
Radiación promedio: 4,84(mW/cm <sup>2</sup> )				

*Fuente: Elaboración propia*

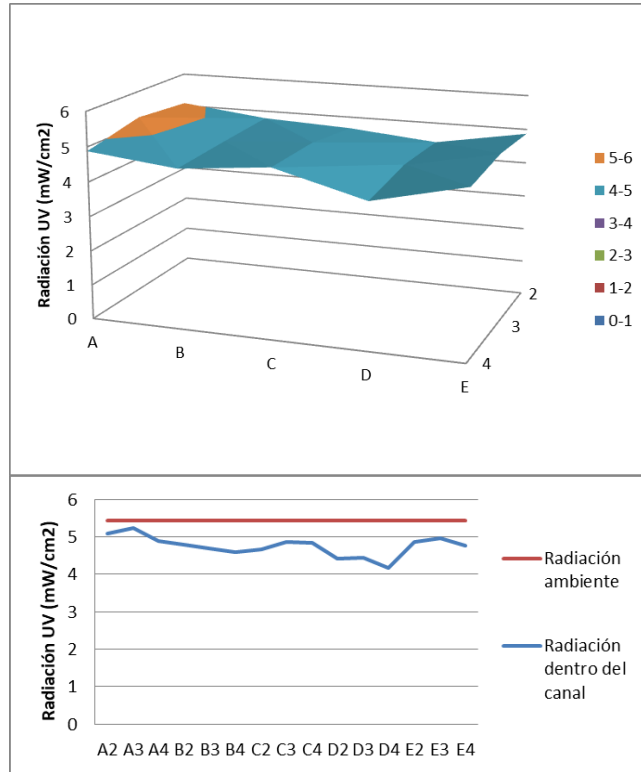
#### 4.1.1. Análisis de malla de radiación ultravioleta sin paneles y sin aletas

En la figura 9 y figura 10, se muestran los resultados obtenidos a partir de la malla de radiación obtenida de la medición de puntos dentro del sistema, con los paneles y aletas reflectantes inhabilitados. Así también, se muestra la radiación ultravioleta ambiental promedio monitoreada durante cada experiencia.

En una primera instancia, el canal presenta una visible variación de intensidades de radiación ultravioleta en los distintos puntos de medición, con un máximo de 5,23 mW/cm<sup>2</sup> y un mínimo de 4,16 mW/cm<sup>2</sup>. La radiación ultravioleta ambiental promedio fue de 5,44 mW/cm<sup>2</sup>. En la siguiente medición, las variaciones alcanzan un máximo de 6,45 mW/cm<sup>2</sup> y un mínimo de 4,38 mW/cm<sup>2</sup>. La radiación ultravioleta ambiental para la repetición de esta experiencia fue de 5,44 mW/cm<sup>2</sup>.

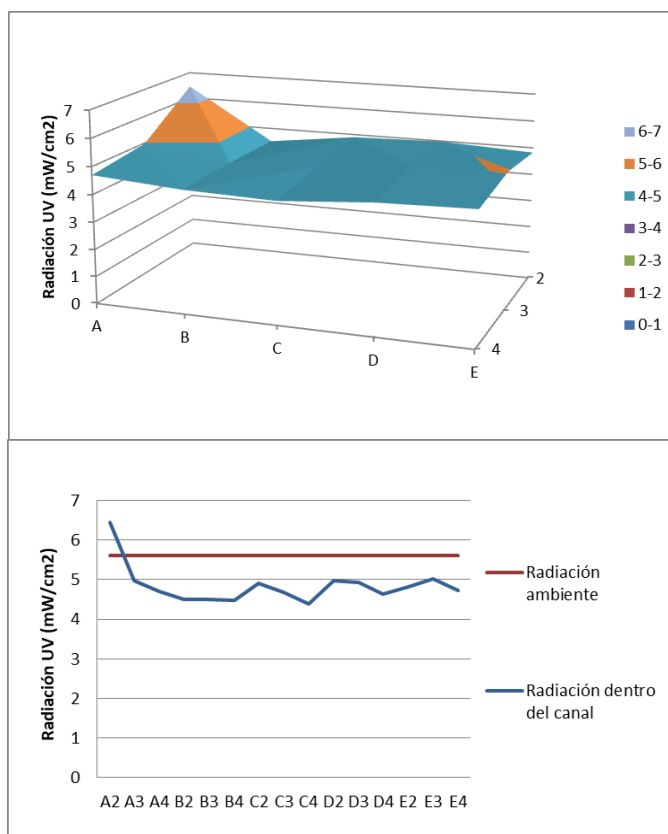
##### a) Niveles de radiación dentro del canal

Utilizando los resultados anteriores se realizaron dos gráficos para cada malla de puntos (figura 9 y 10), con el objetivo de visualizar de mejor manera lo que ocurre para los distintos puntos dentro del canal reflectante, para las condiciones del Escenario 1.



**Figura 9: Resultados área de radiación Escenario 1 (a)**

*Fuente: Elaboración propia.*



**Figura 10: Resultados área de radiación Escenario 1 (b)**

*Fuente: Elaboración propia.*

Tal como se observa en la Figura 9, en ambos gráficos, los niveles de radiación dentro del canal son inferiores a la radiación ambiente promedio para los 15 puntos de medición obtenidos, alcanzando una disminución de entre un 3,86% y un 23,53%. Los valores obtenidos hacia el centro del sistema, correspondiente a la segunda fila de datos de la tabla 6, se visualizan levemente por encima de los datos obtenidos hacia los costados del canal, sin embargo, estos mantienen una tendencia relativamente cercana. En promedio, la malla de puntos de radiación obtenida de la figura 9 disminuyó un 12,68% respecto de la radiación ambiente, con un valor de 4,75 mW/cm<sup>2</sup>. Con una desviación estándar longitudinal de 0.245, 0.294 y 0.295.

Para la segunda medición, figura 10, los niveles de radiación dentro del canal son inferiores a la radiación promedio del ambiente para 14 de los 15 puntos de medición obtenidos. Sin embargo, en uno de los puntos, se observa un aumento considerable respecto a la radiación ambiental, alcanzando un valor de 6,45 mW/cm<sup>2</sup>, lo que dice relación con el reflejo de la radiación en las paredes del canal. Por lo tanto, para esta medición, el valor máximo sobrepasa en un 19% la radiación ambiente, mientras que el mínimo valor medido disminuye en un 19,19% respecto a la misma radiación ambiente. En promedio, la malla de puntos de radiación obtenida disminuyó un 10,65% respecto de la radiación ambiental, con un valor de 4,84 mW/cm<sup>2</sup>. Con una desviación estándar longitudinal de 0.762 para los valores más altos y de 0.148 para los mínimos valores.

4.2. Análisis de resultados Escenario 2

En el escenario 2 se buscaba evaluar el impacto de los paneles en la radiación promedio resultante dentro del canal, dando respuesta al objetivo específico b), utilizando el sistema 2A. Así mismo, mediante el sistema 2B, se buscaba evaluar el impacto de las aletas reflectantes en la radiación promedio resultante dentro del canal, dando respuesta al objetivo c). Por último, con el sistema 2C, se buscaba evaluar el impacto de la variación de alturas de los paneles laterales en la radiación promedio dentro del canal, respondiendo el objetivo d). Todos los datos obtenidos con anterioridad responden a la alimentación de radiación ultravioleta únicamente de origen natural (solar).

Los datos obtenidos en esta primera experiencia (Sistema 2A), se exponen a continuación, en la tabla 8:

**Tabla 8: Resultado de malla de radiación Escenario 2 Sistema 2A**

Malla radiación ultravioleta con paneles, sin aletas (mW/cm <sup>2</sup> )				
4,31	4,36	4,72	4,85	4,48
4,51	4,58	5,60	6,26	6,20
4,79	4,70	5,55	4,98	4,86
4,50	4,55	4,43	4,46	4,35
4,28	4,51	4,43	4,59	5,02
Radiación ambiente: 5,30(mW/cm <sup>2</sup> )				
Radiación promedio: 4,79(mW/cm <sup>2</sup> )				

*Fuente: Elaboración propia*

Los datos obtenidos en la experiencia aplicada al sistema 2B, se exponen a continuación, en las tablas 9 y 10:

**Tabla 9: Resultado de malla de radiación Escenario 2 Sistema 2B**

Resultados de radiación solar con paneles y aletas (mW/cm <sup>2</sup> )				
4,47	4,82	4,90	4,58	4,57
5,09	4,84	4,94	4,90	4,80
5,25	4,80	5,07	4,99	5,00
6,12	5,72	6,01	6,50	6,70
4,95	4,91	4,94	4,86	5,40
Radiación ambiente: 4,98(mW/cm <sup>2</sup> )				
Radiación promedio: 5,17(mW/cm <sup>2</sup> )				

*Fuente: Elaboración propia*

**Tabla 10: Resultado de malla de radiación Escenario 2 Sistema 2B**

Malla radiación ultravioleta con paneles y aletas (mW/cm <sup>2</sup> )				
4,61	4,59	4,68	4,72	4,63
5,67	11,27	8,90	9,67	8,38
4,44	4,42	4,40	4,47	4,58
4,33	4,47	4,38	4,47	3,85
4,48	4,56	4,62	4,62	4,81
Radiación ambiente: 4,63(mW/cm <sup>2</sup> )				
Radiación promedio: 5,27(mW/cm <sup>2</sup> )				

*Fuente: Elaboración propia*

Los datos obtenidos en la experiencia aplicada al sistema 2C, se exponen a continuación, en las tablas 11, 12 y 13:

**Tabla 11: Resultado de malla de radiación Escenario 2 Sistema 2C**

Malla radiación ultravioleta con paneles medio brazo (mW/cm <sup>2</sup> )				
4,41	4,64	4,66	4,65	4,76
4,62	4,51	4,43	4,56	4,32
4,62	4,55	4,59	4,70	4,60
7,67	11,06	10,28	8,75	5,22
4,79	4,78	4,79	4,82	4,89
Radiación ambiente: 4,78(mW/cm <sup>2</sup> )				
Radiación promedio: 5,43(mW/cm <sup>2</sup> )				

*Fuente: Elaboración propia*

**Tabla 12: Resultado de malla de radiación Escenario 2 Sistema 2C**

Malla radiación ultravioleta con paneles medio brazo(mW/cm <sup>2</sup> )				
3,77	3,69	3,44	3,81	3,93
4,77	5,51	5,57	8,14	4,67
3,53	3,63	3,62	3,65	3,71
3,53	3,66	3,64	3,59	3,72
3,59	3,70	3,75	3,86	3,92
Radiación ambiente: 3,67(mW/cm <sup>2</sup> )				
Radiación promedio: 4,1(mW/cm <sup>2</sup> )				

*Fuente: Elaboración propia*

**Tabla 13: Resultado de malla de radiación Escenario 2 Sistema 2C**

Malla radiación ultravioleta con paneles brazo alto(mW/cm2)				
3,29	3,06	3,14	3,00	2,98
3,39	3,32	2,91	2,63	2,98
3,95	3,45	2,89	2,70	2,94
7,57	7,01	9,82	5,94	3,02
3,00	3,68	3,51	3,12	3,12
Radiación ambiente: 3,13(mW/cm2)				
Radiación promedio: 3,86(mW/cm2)				

*Fuente: Elaboración propia*

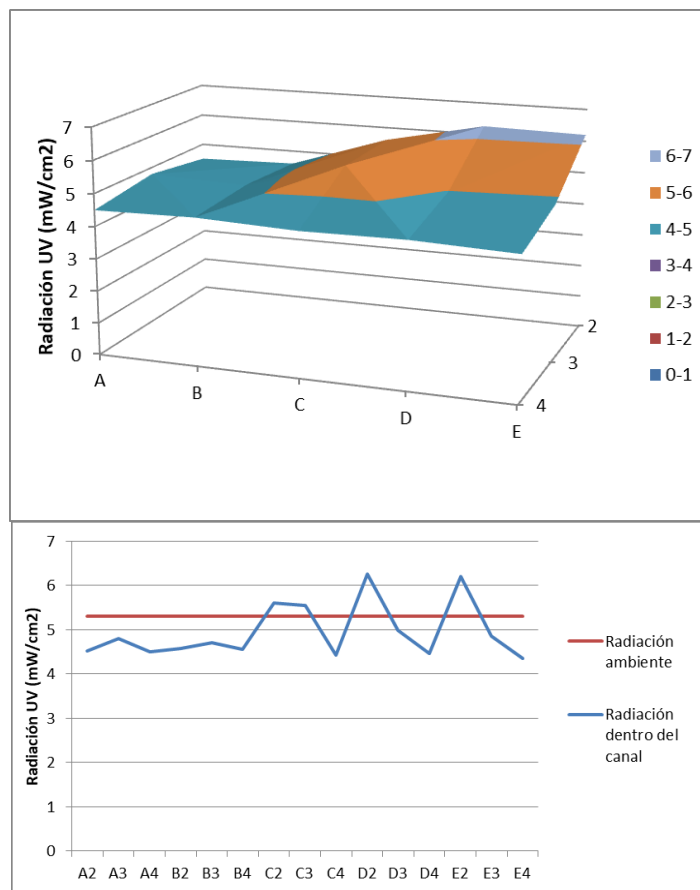
#### 4.2.1. Análisis de malla de radiación ultravioleta con paneles y sin aletas

En la tabla 8, se muestran los resultados a partir de la malla de radiación obtenida de la medición de puntos dentro del sistema, bajo el efecto de los paneles y con las aletas reflectantes inhabilitadas. Así también, se muestra la radiación ultravioleta ambiental promedio monitoreada durante la experiencia.

El canal presenta una visible variación de intensidades de radiación ultravioleta en los distintos puntos de medición, con un máximo de 6,26 mW/cm<sup>2</sup> y un mínimo de 4,35 mW/cm<sup>2</sup>, al considerar únicamente las filas 2, 3 y 4, ya que estas son las que están directamente relacionadas con el impacto de la radiación sobre el cuerpo de agua. La radiación ultravioleta ambiental promedio fue de 5,30 mW/cm<sup>2</sup>.

##### a) Niveles de radiación dentro del canal

Utilizando los resultados anteriores se realizaron dos gráficos (figura 9), con el objetivo de visualizar de mejor manera lo que ocurre en los distintos puntos dentro del canal reflectante, para las condiciones del Escenario 2, Sistema 2A.



**Figura 11: Resultados área de radiación Escenario 2A**

*Fuente: Elaboración propia.*

Como se observa en la Figura 11, en ambos gráficos, existen puntos que se mantienen por debajo y otros puntos que logran estar por encima de la radiación ultravioleta medida en el ambiente, teniendo un punto mínimo de lectura con un 17,92% de disminución y un punto máximo que supera la radiación ambiental en un 18,11%. Los valores obtenidos hacia el costado oeste del sistema, correspondiente a la segunda fila de datos de la Tabla 8, se visualizan notoriamente por encima de los datos obtenidos hacia el otro costado del canal. En promedio, la malla de puntos de radiación obtenida de la Figura 9 disminuyó un 6,6% respecto de la radiación ambiente, con un valor de  $4,95 \text{ mW/cm}^2$ . Con una desviación estándar en el lado de mínimos valores de 0.075 y en el lado de los máximos valores la desviación estándar alcanzó 0.848.

#### 4.2.2. Análisis de malla de radiación ultravioleta con paneles y aletas

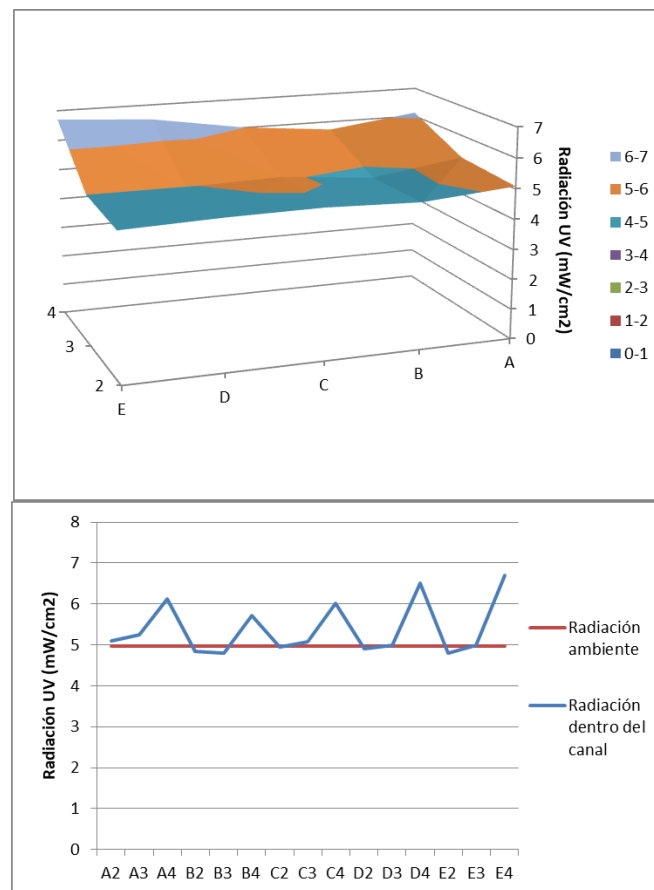
En la Tabla 9 y Tabla 10, se muestran los resultados a partir de la malla de radiación obtenida de la medición de puntos dentro del sistema, bajo el efecto de los paneles y las aletas reflectantes. Así también, se muestra la radiación ultravioleta ambiental promedio monitoreada durante cada una de las experiencias.



Al igual que en las experiencias anteriores, el canal presenta una visible variación de intensidades de radiación ultravioleta en los distintos puntos de medición, alcanzando un máximo de  $6,70 \text{ mW/cm}^2$  y un mínimo de  $4,8 \text{ mW/cm}^2$ , al considerar únicamente las filas 2, 3 y 4, ya que estas son las que están directamente relacionadas con el impacto de la radiación sobre el cuerpo de agua. La radiación ultravioleta ambiental promedio esta vez fue de  $4,98 \text{ mW/cm}^2$ .

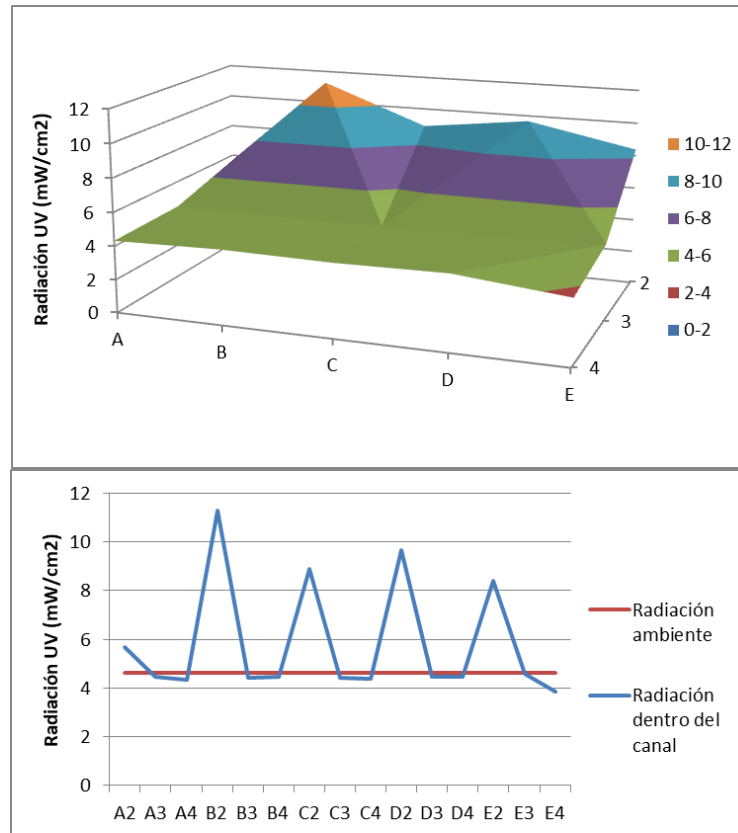
a) Niveles de radiación dentro del canal

Utilizando los resultados anteriores se realizaron dos gráficos para cada malla de datos (Figura 12 y Figura 13), con el objetivo de visualizar de mejor manera lo que ocurre en los distintos puntos dentro del canal reflectante, para las condiciones del Escenario 2, sistema 2B.



**Figura 12: Resultados área de radiación Escenario 2B**

*Fuente: Elaboración propia.*



**Figura 13: Resultados área de radiación Escenario 2B**

*Fuente: Elaboración propia.*

En la Figura 12, en ambos gráficos, una gran cantidad de puntos alcanza un valor similar al de la radiación ultravioleta medida en el ambiente, teniendo un punto mínimo de lectura con un 3.61% de disminución. Aunque, también se visualizan una gran cantidad de puntos que sobrepasan este valor; estos puntos altos están ubicados hacia el costado oeste del sistema, correspondiente a la cuarta fila de datos de la Tabla 9, alcanzando un valor máximo que supera a la radiación ambiental en un 34.54%. En promedio, la malla de puntos de radiación obtenida de la Figura 12 logró aumentar un 8.03% respecto de la radiación ambiente, con un valor de 5,38 mW/cm<sup>2</sup>, sobre 4,98 mW/cm<sup>2</sup>. Alcanzando desviaciones estándar entre 0.0112 y 0.391, en sentido longitudinal.

Como se observa en la Figura 13, en ambos gráficos, la gran mayoría de puntos alcanza un valor similar al de la radiación ultravioleta medida en el ambiente, teniendo un punto mínimo de lectura con un 16,85% de disminución. Sin embargo, también se visualizan una gran cantidad de puntos que sobrepasan este valor notoriamente; estos puntos altos están ubicados hacia el costado este del sistema, correspondiente a la segunda fila de datos de la Tabla 10, alcanzando un valor máximo que supera a la radiación ambiental en un 143,41%. En promedio, la malla de

puntos de radiación obtenida de la Figura 13 logró aumentar un 26,35% respecto de la radiación ambiente, con un valor de  $5,85 \text{ mW/cm}^2$ , sobre  $4,63 \text{ mW/cm}^2$ . Con una desviación estándar de 2.05 en su lado de máximos valores de radiación y de 0.07 en el centro del canal. En la zona de mínimos la desviación estándar fue 0.258.

#### *4.2.3. Análisis de malla de radiación ultravioleta aletas y paneles a diferente altura*

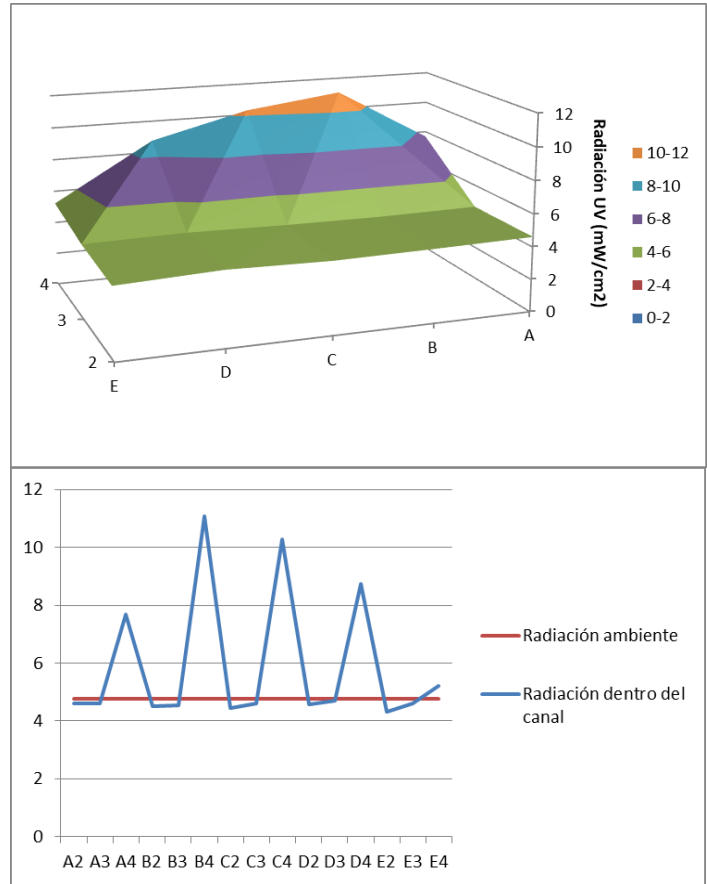
En la Tabla 11, Tabla 12 y Tabla 13, se muestran los resultados a partir de la malla de radiación obtenida de la medición de puntos dentro del sistema, bajo el efecto de las aletas y con los paneles a altura media y alta. Así también, se muestra la radiación ultravioleta ambiental promedio monitoreada durante cada experiencia.

Para la primera malla de puntos, el canal presenta una clara tendencia alta de radiación hacia uno de sus costados, alcanzando un máximo de  $11,06 \text{ mW/cm}^2$  y un mínimo de  $4,32 \text{ mW/cm}^2$ , al considerar únicamente las filas 2, 3 y 4, ya que estas son las que están directamente relacionadas con el impacto de la radiación sobre el cuerpo de agua. La radiación ultravioleta ambiental promedio fue de  $4,78 \text{ mW/cm}^2$ .

##### a) Niveles de radiación dentro del canal

Utilizando los resultados anteriores se realizaron dos gráficos para cada malla de datos (Figura 14, Figura 15 y Figura 16), con el objetivo de visualizar de mejor manera lo que ocurre en los distintos puntos dentro del canal reflectante, para las condiciones del Escenario 2, sistema 2C.

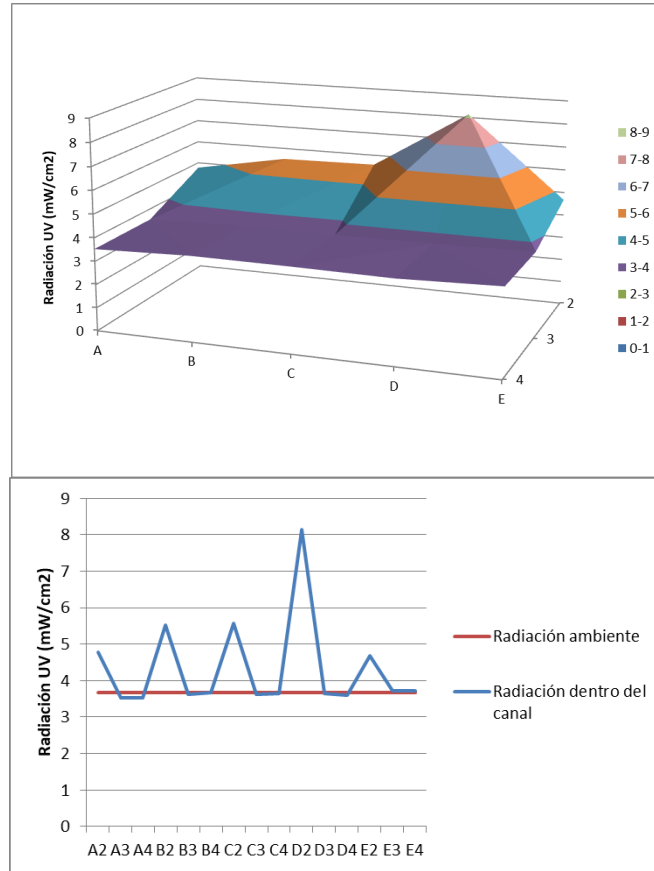
En la Figura 14, en ambos gráficos, una gran cantidad de puntos alcanza un valor similar al de la radiación ultravioleta medida en el ambiente, específicamente aquellos situados hacia el centro del canal y hacia el este, teniendo un punto mínimo de lectura con un 9.62% de disminución. Se visualizan, además, una gran cantidad de puntos que sobrepasan este valor; estos puntos altos están ubicados hacia el costado oeste del sistema, correspondiente a la cuarta fila de datos de la Tabla 11, alcanzando un valor máximo que supera a la radiación ambiental en un 131,38%. En promedio, la malla de puntos de radiación obtenida de la Figura 14 logró aumentar un 23,43% respecto de la radiación ambiente, con un valor de  $5,90 \text{ mW/cm}^2$ , sobre  $4,78 \text{ mW/cm}^2$ . Con una desviación estándar longitudinal de 2.30 en su extremo de valores altos..



**Figura 14: Resultados área de radiación Escenario 2C**

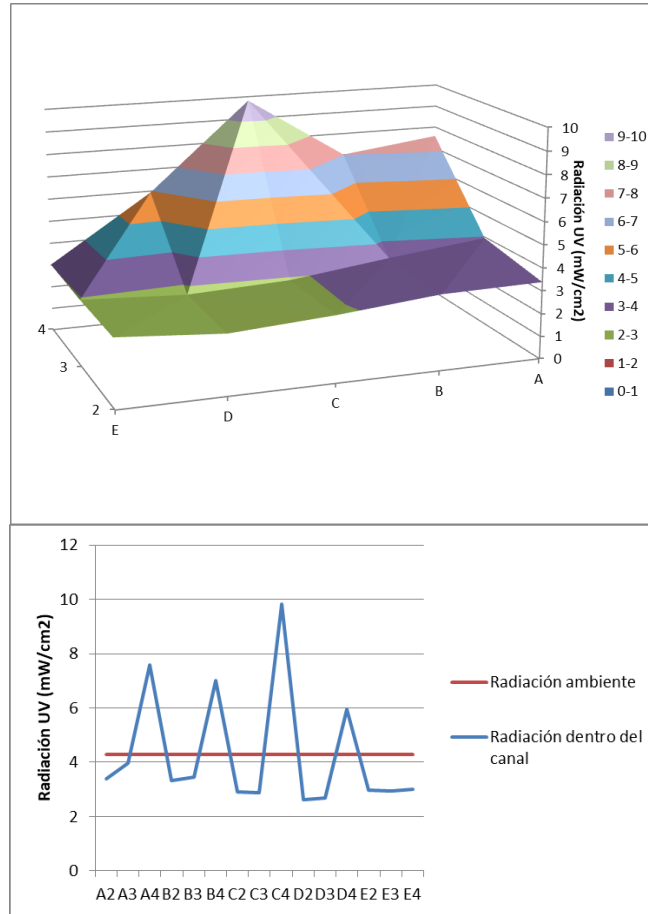
*Fuente: Elaboración propia.*

En la Figura 15, en ambos gráficos, una gran cantidad de puntos alcanza un valor similar al de la radiación ultravioleta medida en el ambiente, específicamente aquellos situados hacia el centro del canal y hacia el oeste, teniendo un punto mínimo de lectura con un 3,81% de disminución. Se visualizan, además, una cantidad de puntos que sobrepasan este valor; estos puntos altos están ubicados hacia el costado este del sistema, correspondiente a la segunda fila de datos de la Tabla 12, alcanzando un valor máximo que supera a la radiación ambiental en un 121,8%. En promedio, la malla de puntos de radiación obtenida de la Figura 15 logró aumentar un 17,71% respecto de la radiación ambiental, con un valor de 4,32 mW/cm<sup>2</sup>, sobre 3,67 mW/cm<sup>2</sup>. Con una desviación estándar longitudinal de 1.4 en el lateral de máximos valores de radiación ultravioleta



**Figura 15: Resultados área de radiación Escenario 2C**

*Fuente: Elaboración propia.*



**Figura 16: Resultados área de radiación Escenario 2C**

*Fuente: Elaboración propia.*

En la Figura 16, se observa que una parte de los puntos medidos alcanza un valor inferior al de la radiación ultravioleta medida en el ambiente, específicamente aquellos situados hacia el centro del canal y hacia el este, teniendo un punto mínimo de lectura con un 13,74% de disminución. Se visualizan, además, una gran cantidad de puntos que sobrepasan este valor; estos puntos altos están ubicados hacia el costado oeste del sistema, correspondiente a la cuarta fila de datos de la Tabla 13, alcanzando un valor máximo que supera a la radiación ambiental en un 213,74%. En promedio, la malla de puntos de radiación obtenida de la Figura 15 logró aumentar un 37,38% respecto de la radiación ambiental, con un valor de 4,30 mW/cm<sup>2</sup>, sobre 3,13 mW/cm<sup>2</sup>. Con una desviación estándar de 2.485 en el lado longitudinal de los valores máximos obtenidos de radiación ultravioleta

### 4.3. Análisis de resultados Escenario 3

En el escenario 3 se buscaba medir la eliminación de coliformes fecales y coliformes totales para distintos tiempos de residencia hidráulicos en el sistema de desinfección, dando respuesta al objetivo específico e), utilizando el sistema 1A y el sistema 2C. Todos los datos obtenidos con anterioridad responden a la alimentación de radiación ultravioleta únicamente de origen natural (solar). La alimentación del afluente se realizó con flujo constante, proveniente de la salida del tratamiento del humedal de flujo subsuperficial.

Los datos obtenidos en esta primera experiencia (Sistema 2A), se exponen a continuación, en las tablas 14, 15, 16 y 17:

**Tabla 14: Resultado de análisis de laboratorio Escenario 3, TRH 20 y 40 min**

Muestreo 1		Resultados		
TRH=20 min y 40 min			CF	CT
Nombre frasco	Identificación	Radiación ambiente		
BT0	Muestra virgen	5,35 (mW/cm <sup>2</sup> )	>1600	>1600
BT1	Muestra a los 20 min a 25% de la entrada	5,3 (mW/cm <sup>2</sup> )	>1600	>1600
BT2	Muestra a los 20 min a 75% de la entrada		>1600	>1600
BT3	Muestra a los 40 min a 25% de la entrada	5,06 (mW/cm <sup>2</sup> )	>1600	>1600
BT4	Muestra a los 40 min a 75% de la entrada		>1600	>1600
BT5	Muestar virgen		>1600	>1600

*Fuente: Elaboración propia.*

**Tabla 15: Resultado de análisis de laboratorio Escenario 3, TRH 30 min**

Muestreo 2		Resultados		
TRH=30min			CF	CT
Nombre frasco	Identificación	Radiación ambiente		
B30A	Muestra virgen	4,97 (mW/cm <sup>2</sup> )	>1600	>1600
B30B	Muestra luego de 30 min a 25% de la entrada		>1600	>1600
B30C	Muestra luego de 30 min a 75% de la entrada		1600	1600
B30D	Muestra luego de 30 min a la salida del canal		920	920

*Fuente: Elaboración propia.*

**Tabla 16: Resultado de análisis de laboratorio Escenario 3, TRH 30 min, sin paneles**

Muestreo 3			Resultados	
TRH=30min sin paneles			CF	CT
Nombre frasco	Identificación	Radiación ambiente		
B30E	Muestra luego de 30 min a 25% de la entrada	5,07 (mW/cm <sup>2</sup> )	>1600	>1600
B30F	Muestra luego de 30 min a 50% de la entrada		>1600	>1600
B30G	Muestra luego de 30 min a 75% de la entrada		>1600	>1600
B30M	Muestra luego de 30 min a la salida del canal		>1600	>1600

*Fuente: Elaboración propia.*

**Tabla 17: Resultado de análisis de laboratorio Escenario 3, TRH 90 min**

Muestreo 4			Resultados	
TRH=90min			CF	CT
Nombre frasco	Identificación	Radiación ambiente		
B90H	Muestra luego de 90 min a 25% de la entrada	4,73 (mW/cm <sup>2</sup> )	>1600	>1600
B90I	Muestra luego de 90 min a 50% de la entrada		>1600	>1600
B90J	Muestra luego de 90 min a 75% de la entrada		920	920
B90K	Muestra luego de 90 min a la salida del canal		920	920
			Resultados	
			CF	CT
B90L	Muestra virgen		>1600	>1600

*Fuente: Elaboración propia.*

#### 4.3.1. Análisis de resultados de coliformes totales y coliformes fecales de laboratorio

En las tablas 14 a la 17, se muestran los resultados de laboratorio de las distintas muestras analizadas, a partir de los diferentes tiempos de residencia hidráulicos definidos, bajo el efecto de la radiación ultravioleta solar, dentro del sistema reflectante.

En base a las tablas 15 y 17, se puede observar que los resultados comienzan a ser favorables a partir del TRH 30 min, utilizando el sistema reflectante completo, obteniéndose una disminución que alcanza los 920 nmp/ml de coliformes fecales (CF) y coliformes totales (CT), cuando los niveles de ingreso sobrepasaron los 1600 nmp/ml, tanto de CF como de CT.



## 5. CAPITULO V: CONCLUSIONES

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

Del Escenario 1, la radiación promedio resultante al interior del canal alcanzó valores inferiores a la radiación medida en el ambiente. A pesar de la materialidad reflectante del canal, las paredes interfieren en el paso adecuado de la radiación proveniente del ambiente hasta la zona de medición.

Del Escenario 2, en el análisis del efecto de los paneles reflectantes, se obtuvo un valor de radiación neta promedio un 6,6% menor a la radiación ambiental, a diferencia del 10,65% de disminución obtenido sin paneles. En el análisis del efecto de las aletas reflectantes se aumentó la radiación promedio del canal respecto a la ambiental, en un rango de 8,03% a 26,35%. Con el aumento de la altura de los paneles reflectantes en 25 cm y uso de aletas simultáneamente, se obtuvo un aumento de radiación de 23,43% y de 17,71%. Con el aumento de la altura de los paneles en 50 cm, con el uso simultáneo de aletas, se incrementó la radiación promedio dentro del canal, siendo un 37,38% mayor respecto a la radiación ambiental. El uso de los paneles tienen una relevancia significativa al aumentar la radiación promedio resultante dentro del canal. Permiten reutilizar rayos ultravioleta reflejándolos al interior. Las aletas permiten que el aporte de los paneles sea mucho mayor, aportando área de reflexión, siendo un factor categórico en el aumento de la radiación. La altura de los paneles es un parámetro relevante del diseño, que influye altamente en la efectividad del aumento de la radiación solar ultravioleta resultante dentro del canal.

Del Escenario 3, en el primero muestreo, TRH 20 y 40 min, a 25 y 75% de la entrada, no se observan disminuciones de CT y CF. En el segundo muestreo, TRH 30 min, se obtienen valores disminuidos a 1600 CT y CF (nmp/100ml) y en el último tramo una disminución de un 42,5% alcanzando un valor de 920 (nmp/100ml). Para el tercer muestreo, se utilizó un TRH de 30 min, igual que el muestreo anterior, inhabilitando los paneles y aletas laterales, sin observarse disminuciones de CT y CF. Aun con una radiación ambiental promedio mayor de 5,07 (mW/cm<sup>2</sup>). En el cuarto muestreo, con TRH de 90 min, se obtuvo una disminución de CT y CF a partir de la muestra tomada a un 75% de la entrada y en la salida. El valor fue de 920 (nmp/100ml) con lo cual se cumple la norma. El canal logra desinfectar las aguas, según el parámetro utilizado, a partir de un TRH de 30 min y con tiempos de residencia de 90 minutos aumenta ostensiblemente su eficacia. El uso de los paneles y aletas reflectantes es determinante al momento de evaluar la disminución de Coliformes Totales y Fecales, aportando no tan solo al aumento de la radiación, sino a la efectividad de desinfección y abriendo la ventana a una tecnología sustentable y LIMPIA.

## 6. CAPITULO VI: REFERENCIAS

- AMEQA. (s.f.). *Investigación de la ecotoxicología y la química ambiental*. México: Asociación mesoamericana de la ecotoxicología y química ambiental.
- Benítez Rodas, G. A. (2013). *Análisis y modelización de la inactivación de Escherichia Coli en aguas residuales y pluviales*, Barranquilla.
- CENTA. (2007). *Manual de tecnologías no convencionales para la depuración de aguas residuales*. Centro de tecnologías del agua de Sevilla.
- CIDERH. (21 de julio de 2018). *CIDERH. Centro de investigación y desarrollo en recursos hídricos*. Obtenido de <http://www.ciderh.cl/wp-content/uploads/2015/04/FICHA3.pdf>
- Hernández, M. (2010) “*Metodología para la prospección de agua subterránea utilizando información satelital y datos obtenidos en forma tradicional*”, Quito.
- Meierhofer, R., & Wegelin, M. (2003). *Desinfección solar del agua “Guía de aplicación”*. Programade agua y Saneamiento.
- Metcalf & Eddy. (2003). *Ingeniería de aguas residuales tratamiento, vertido y reutilización*. Madrid: McGraw-Hill.
- OMS. (2008). *Guías para la calidad del agua potable*. Ginebra.
- OMS. (25 de julio de 2018) *proyecto de mejoramiento de la calidad del agua, de consumo humano, en centro américa*. Obtenido de <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsacg/e/fulltext/pmca/pmca.pdf>
- ONU. (2006). *Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Informe sobre Desarrollo Humano*. New York.
- Organización Panamericana de la Salud. (2005). *Guía para el mejoramiento de la calidad del agua a nivel casero*. Lima.

- Oropeza, V. (20 de junio de 2018). *Parque Reserva, Península del Carrizal*. Obtenido de [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lar/oropeza\\_b\\_vm/capitulo4.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lar/oropeza_b_vm/capitulo4.pdf)
- Painter, H. (1979). *Chemical, physical and biological characteristics of wáter efluents*. New York.
- RODIE B. & HARDENBERG. (1987). *Ingeniería Sanitaria. Ed. Continental S.A. de C. V.* México D.F.
- 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**

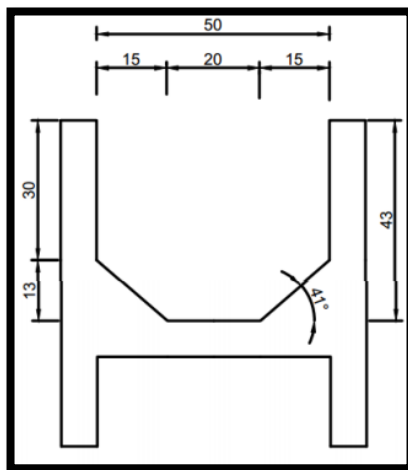
## ANEXO A. CONSTRUCCIÓN CANALES

### a) Diseño de los canales

La elección del diseño se basa en una estructura simple y de bajo costo, diseñada por Ruiz, D (2017), 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 trapezoidal, con el objetivo de permitir una mejor utilización de los rayos ingresados, a partir de las reflexiones proyectadas. Las dimensiones están detalladas en la figura A1.

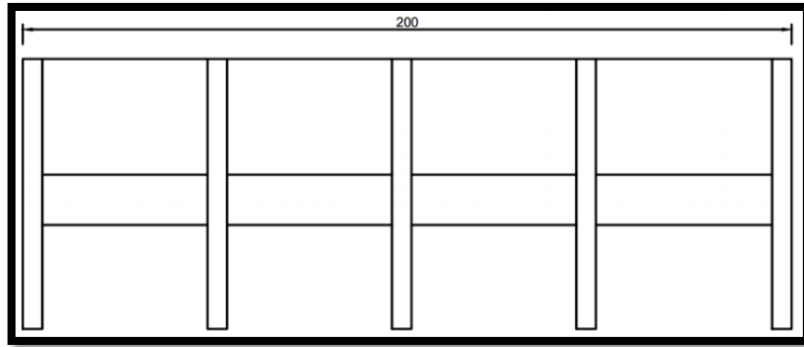


**Figura A1: Sección transversal del canal.**

*Fuente: Ortiz, 2016.*

- Sección longitudinal

La sección longitudinal cuenta con una extensión de dos 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. Ver Figura A3.



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

*Fuente: Ruiz, 2017.*

- Material reflectante

El material reflectante elegido por Ortiz (2016) 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: Ruiz, 2017.*

- Válvula de paso.

En la entrada del canal, se instala una tubería con válvula, la que permite regular el caudal que ingresa al sistema de manera continua, permitiendo regular los caudales del afluente y, por ende, definiendo diferentes tiempos de residencia hidráulicos. Ver figura A5.



**Figura A5: Válvula de control del afluente.**

*Fuente: elaboración propia.*

ANEXO B. REGISTRO FOTOGRÁFICO



**Figura B1: Ubicación de dispositivo.**

*Fuente: elaboración propia.*



**Figura B2: Instalación del canal a la salida del Humedal Artificial.**

*Fuente: elaboración propia*





**Figura B3: Instalación paneles y aletas reflectantes.**

*Fuente: elaboración propia*



**Figura B4: Dispositivo en funcionamiento.**

*Fuente: elaboración propia*



**Figura B5: Toma de datos Radiación UV.**

*Fuente: elaboración propia*

## ANEXO D. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS MEDIDOR DE RADIACIÓN ULTRAVIOLETA

<b>ESPECIFICACIONES TÉCNICAS</b>	
Monitor	Tamaño LCD: 28 x 19 mm
Espectro sensor UV	Paso de banda de 260nm 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