



Universidad de Concepción



FACULTAD DE CIENCIAS
AMBIENTALES

INSTALACIÓN Y PUESTA EN MARCHA DE UN SISTEMA DE DESINFECCIÓN UV A ESCALA PILOTO

Habilitación presentada para optar al título de
Ingeniero Ambiental

ARIEL ALEJANDRO ÁLVAREZ ORTEGA
Profesora Guía: **Dra. Gladys Vidal Sáez**

Concepción, Chile
2018



“Instalación y puesta en marcha de un sistema de desinfección UV a escala Piloto”.

PROFESOR GUÍA: Dra. GLADYS VIDAL SÁEZ

PROFESOR COMISIÓN: Dr. RICARDO BARRA RÍOS

PROFESOR COMISIÓN: Dr. ROBERTO URRUTIA PÉREZ

CONCEPTO: APROBADO CON DISTINCIÓN MÁXIMA

Conceptos que se indica en el Título

- ✓ Aprobado por Unanimidad : (En Escala de 4,0 a 4,9)
- ✓ Aprobado con Distinción (En Escala de 5,0 a 5,6)
- ✓ Aprobado con Distinción Máxima (En Escala de 5,7 a 7,0)

Concepción, diciembre 2018



100 AÑOS
DE
DESARROLLO
LIBRE DEL
ESPIRITU

NOMENCLATURA

APR	Asociación de Agua Potable Rural	
DBO ₅	Demanda Biológica de Oxígeno	(mg/L)
DBP	Disinfection by-products (sub-productos de la desinfección)	
DQO	Demanda Química de Oxígeno	(mg/L)
HFHSS	Humedal de Flujo Horizontal Sub-superficial	
IPD	Influente del Proceso de Desinfección	
PTAS	Planta de Tratamiento de Aguas Servidas	
SP-UV	Sistema Piloto Ultravioleta	
SST	Solidos Suspendidos Totales	(mg/L)
TRH	Tiempo de Retención Hidráulico	(d)
UV	Ultravioleta	

INDICE

RESUMEN	viii
1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	3
2.1 Objetivo general	3
2.2 Objetivos específicos	3
3. ANTECEDENTES	4
3.1 Situación de Desinfección en zonas rurales	4
3.2 Alternativas de desinfección	7
3.2.1. Desinfección por Cloro	9
3.2.2 Desinfección por Ultravioleta	12
3.3 Análisis de UV como desinfectante seleccionado	13
3.4 Mecanismo de desinfección UV	15
3.4.1 Reparación de daño UV	18
3.5 Factores en el diseño de un sistema UV	18
3.5.1 Lámparas UV de baja intensidad y baja presión	20
3.5.2 Sistemas de desinfección de canal abierto	21
3.5.3 Componente Hidráulico	22
3.6 Esquema de una instalación de SP-UV	22
3.7 Problemas de partida y mantenciones	23
3.8 Condiciones de operación	24
4. METODOLOGÍA	26
4.1. Área de estudio	26
4.1.1 Características de las unidades de HFHSS	27
4.2 Instalación de Sistema Piloto-UV	28
4.2.1 Descripción de equipos cotizados para la SP-UV	29

4.3 Descripción del proceso de desinfección en la SP-UV	32
4.4 Obtención de las muestras a analizar en los puntos de control	33
4.5 Caracterización de muestras obtenidas	33
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	35
5.1 Equipos Instalados en la Unidad de Desinfección UV	35
5.2 Caracterización del influente al reactor UV y el efluente posterior a ese proceso	35
5.2.1 Caracterización Físicoquímica del influente y efluente.....	36
5.2.2 Caracterización Microbiológica preliminar del influente y efluente después de la instalación del sistema UV	37
5.3 PROBLEMAS ASOCIADOS AL FUNCIONAMIENTO.....	38
Problemática 1: Formación de Biofilm y acumulación de sedimentos.....	38
Problemática 2: Pérdida de vacío en el conducto de la bomba de extracción	39
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	41
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	43

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Tipo de organización en la administración de PTAS rurales a nivel nacional.....	6
Figura 2. Cobertura de PTAS en APR´s a nivel nacional.....	7
Figura 3. Efectos de la radiación UV en las células.	13
Figura 4. Formación de dobles enlaces en microorganismos expuestos a la radiación ultravioleta.	16
Figura 5. Vista en sección transversal de un reactor UV de Canal Abierto. Fuente: Elaboración propia.	21
Figura 6. Diagrama de Sistema Piloto de Desinfección UV.	23
Figura 7. Sistema de desinfección UV de PTAS ubicadas en: A) y B). Sector el Maitén, Isla de Maipo. Región Metropolitana; C) y D). Villa Peter Horn. Putaendo, región de Valparaíso; E) y F). Colegio de Villa La Compañía. Graneros, región de O´Higgins.	25
Figura 8. Ubicación de Planta de Tratamiento de Aguas Servidas, Planta Piloto HFSS y nueva unidad de Desinfección UV. ($36^{\circ}59'26.93''$ latitud sur y $72^{\circ}56'47.23''$ de longitud oeste).	26
Figura 9. A). Vista Sur Este de la planta piloto; B). Vista Noroeste de la planta piloto.	27
Figura 10. Sitios tentativos para la ubicación de la Sistema Piloto-UV	28
Figura 11. A). Vista Oeste de la planta piloto y lugar elegido para instalar SP-UV; B). Mediciones para delimitar área de SP-UV.....	29
Figura 12. A. Representación digital Reactor UV modelo HO UV30-187OC; B. Lámpara UV c: GHO36T5L 87W.	29
Figura 13. A). Bomba sumergible Zenit modelo DR BLUE 50-2-G32V-M; B). Estanque Infraplast modelo EVS-650; C). Cámara desgrasadora Bioplastic modelo DES0100.....	31

Figura 14. Esquema de Humedal construido y unidad piloto de desinfección UV.....	32
Figura 15. A). Extracción de muestras en sitio 1. Cámara de acumulación previa a reactor UV; B). Extracción de muestras en sitio 2. Cámara posterior del reactor UV.....	33
Figura 16. Fotografía del sistema piloto de desinfección UV una vez instalado (enero 2018).	35
Figura 17. A) Aspecto de la cámara de decantación, visto desde arriba; B) Detalle de acumulación de partículas, sedimentos y larvas de insectos; C) Aspecto del decantador y el Biofilm generado; D) Detalle de material extraído que decantaba en el reactor.	38
Figura 18. A) Estanque de recepción y conducto de aspiración operando en buenas condiciones. B) Rebalse de fluido en estanque de recepción.	40
Figura 19. A) Cebado de la bomba B) Flotador de nivel y contrapeso extraídos del tanque de recepción.....	40

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Plantas de tratamientos de aguas servidas PTAS rurales a nivel nacional en el año 2012.....	5
Tabla 2. Efectos sobre la salud de algunos subproductos de la desinfección de cloro.....	11
Tabla 3. Dosis UV en mJ/cm^2 para inactivar una población microbiana en 1 Log (90%) y 2 Log (99%).....	17
Tabla 4. Características típicas operativas para lámparas UV.	19
Tabla 5. Ventajas operativas de la lámpara de vapor de mercurio.....	20
Tabla 6. Especificaciones Técnicas de Reactor UV modelo HO UV30-187OC.30	
Tabla 7. Especificaciones Técnicas de Lámpara UV GHO36T5L 87W.....	30
Tabla 8. Resumen de la caracterización fisicoquímica en previa y posterior al reactor UV.....	36
Tabla 9. Resultados de parámetros microbiológicos y reducción logarítmica. .	37

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradeceré a mis padres Jorge y Elizabeth, junto con mi hermana Nataly. Grandes sustentos de mi resiliencia en este proceso.

Mi abuela Clara y mi abuelo Pedro, de quien tengo la convicción que siempre estuvo conmigo a pesar de su temprana partida.

Gracias a los grandes amigos y amigas que conocí durante mi vida universitaria. En ellos recibí palabras de aliento, minutos valiosos de alegría, consejos que se perpetuaran y la satisfacción que podré contar con ellos y ellas siempre.

En especial quiero dar mis reconocimientos para Diego, Carla, Jacqueline, Karen y Felipe. En esas personas reside mi mayor fortaleza alcanzada, junto a la superación de grandes procesos y el aprendizaje de grandes enseñanzas de vida.

Es necesario también, reconocer a todos los académicos que tuve en las diversas asignaturas. Personas quienes cimentaron grandes conocimientos durante mi periodo académico.

Mi mayor gratitud para mi profesora Guía, la Dra. Gladys Vidal. Su confianza permanente en mis capacidades y en mi proyecto de Habilitación Profesional fue determinante en la finalización de mi tesis y posterior defensa de título.

Además, quiero agradecer a los integrantes del grupo GIBA, quienes me brindaron su apoyo, conocimientos y consejos.

Por último, quiero agradecer expresamente a quienes financiaron esta investigación. Al proyecto CONICYT/FONDAP N°15130015, "Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y la Minería" CHRIAM, por la beca otorgada para la realización de esta tesis.

RESUMEN

El tratamiento de las aguas ya dispuestas a la población o a las industrias es una materia importante en la gestión de los recursos hídricos y mucho más aun en situaciones de stress hídricos en diferentes localidades del país. Donde, tenemos que el recurso agua es cada vez más escaso y la reutilización de aguas servidas, que otrora era una alternativa distante hoy se vislumbra como una solución a corto plazo.

En el sector rural se dispone de una baja cobertura a nivel país, donde la gestión pública e inversión en infraestructura es una necesidad imperiosa. Siendo que los cuerpos legales y normativas aprobados en el último tiempo tienden a mejorar la gestión de recurso en todos los niveles.

En este estudio se utilizó un efluente que proviene desde la Planta de Tratamiento de Aguas Servidas (PTAS) de Hualqui, correspondiente a las aguas servidas rurales. El efluente fue tratado previamente por un Humedad Horizontal de Flujo Sub-superficial (HFSS), donde los niveles de sólidos y materia orgánica descienden. Para luego dar paso a un sistema de desinfección UV.

El sistema UV, se conforma principalmente por el reactor UV. Este posee una potencia única de desinfección de 30 [mJ/cm²], siendo capaz de trabajar a diferentes caudales de acuerdo al índice de transmitancia (UVT) que posea el fluido a desinfectar. El sistema de HFSS y el sistema piloto UV lograron un buen acople entre sistemas.

Se originaron diversos problemas que tienen su explicación en el funcionamiento por lotes del sistema, donde la pérdida de continuidad origina las condiciones necesarias para la formación de microorganismos, implicando una incorrecta desinfección.

En relación a los resultados, se obtuvieron eficiencias de eliminación menores a las expresadas en la bibliografía. Siendo estas de 2.5 uLog, 2.0 uLog y 1.5 UFC para Coliformes Totales (CT), Coliformes Fecales (CF) y Colifagos Somáticos (CS), respectivamente.

Palabras Clave: Aguas Servidas, Desinfección UV, Microorganismos, PTAS, RILES, Tratamiento.

1. INTRODUCCIÓN

Según las proyecciones del Instituto Nacional de Estadísticas (INE), al año 2017 habrían 17.3 millones de personas viviendo en nuestro país, de las cuales un 12,6% viven en localidades rurales. De ese total sólo un 23% forma parte de Comités de Agua Potable Rural y saliendo desde ese mismo número solo un 14% de habitantes posee cobertura a un tipo de tratamiento y disposición del recurso hídrico ya utilizado. La cifra anterior, es bastante deficiente para un país en vías de desarrollo y resulta imperiosa la necesidad de generar e implementar nuevas tecnologías en favor de las poblaciones rurales que no disponen de sistemas centralizados como en las grandes ciudades, capaces de recolectar todas las aguas servidas y tratarlas en un lugar fijo, para luego disponerlos al medio ambiente en regla a las normas. Es ahí, cuando la posibilidad del reúso de las aguas residuales aparece como una opción muy valorable.

En la década del 50 empezó a tomar fuerza la idea de considerar las aguas residuales como un recurso hídrico utilizable para diversos fines, después de ser sometido a un tratamiento adecuado. Sus posibles usos son para riego agrícola, acuicultura, uso industrial, uso minero, riego de zonas de recreación, riego de áreas verde y recarga de acuíferos. (Fundación Chile, 2016). Además, de aumentar la disponibilidad del recurso, esta opción permitiría hacer frente a la problemática de la incipiente escasez hídrica que se vive en varias regiones del país.

En muchas regiones bajo escasez de agua, el intensivo desarrollo industrial, la contaminación de los cuerpos de agua superficial y subterránea; la distribución desigual del recurso hídrico (Segura *et al.*, 2018), junto con el aumento de la población especialmente en las ciudades, ha provocado una fuerte presión sobre los recursos hídricos locales. Además, se prevé que el cambio climático comprometa aún más la calidad y disponibilidad del agua para el suministro, así

como el funcionamiento de los ecosistemas acuáticos lo que aumenta la necesidad de encontrar soluciones sostenibles a este apremiante problema.

Se han desarrollado estrategias en las últimas décadas en respuesta a las crecientes demandas de agua, entre las que se puede mencionar la construcción de infraestructuras para el transporte de agua a las zonas deficientes y la construcción de infraestructura hídrica de escala media y menor. Debido a que este tipo de proyectos requieren mucho tiempo y dinero, se están proponiendo soluciones alternativas, como la desalación de agua marina o salobre, el reúso de aguas servidas tratadas y las medidas de conservación del recurso utilizando tecnologías de bajo consumo, como el riego por goteo y sistemas de descarga bajo volumen. Pereira *et al* (2002) afirmaron que, con la finalidad de hacer frente a la escasez de agua, una de las prácticas de gestión y suministro más prometedoras a ser explorada es el reúso de aguas servidas tratadas.

El desarrollo e implementación de prácticas de reúso de aguas servidas tratadas alrededor del mundo han demostrado que es un recurso alternativo fiable, que puede ser vendido como un nuevo producto: el agua reciclada. Más importante aún, esta estrategia puede traer un enfoque completamente nuevo y holístico para la administración del agua: la gestión integrada del recurso con el tratamiento, el manejo y la reutilización de las aguas residuales. Este enfoque se dirige a ambos extremos del proceso: la demanda y suministro de agua y la eliminación de aguas servidas y protección del medio ambiente. Estos dos aspectos de la gestión del agua son considerados como complementarios, hebras que interactúan para avanzar hacia un desarrollo más sostenible (Lazarova *et al.*, 2001).

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

- Evaluar la instalación y puesta en marcha de un sistema de desinfección ultravioleta acoplado a un humedal construido (HFSS).

2.2 Objetivos específicos

- Evaluar la instalación y el funcionamiento en conjunto con el HFSS.
- Establecer los primeros parámetros de funcionamiento y desinfección que tendrá el sistema y comparar los resultados obtenidos bibliográficamente y evaluar la calidad del efluente desinfectado por medio de las normas establecidas.

3. ANTECEDENTES

3.1 Situación de Desinfección en zonas rurales

Las personas más vulnerables a la contaminación de agua en nuestra región son los habitantes de zonas rurales, independiente que las zonas se encuentren cercanas o no de las grandes urbes podemos ver deficiencias en el sistema sanitario que posee.

Es necesario agregar que el terremoto del 27 de febrero de 2010, ocurrido en nuestro país ocasiono una gran cantidad de daños en lo que a infraestructura sanitaria se refiere. Siendo la región del Biobío, la más afectada a nivel nacional (SISS, 2010).

En las aguas servidas se encuentran tres categorías de patógenos: bacterias, virus y parásitos. Algunos de estos patógenos son resistentes a los métodos de desinfección convencionales con cloro, así como, la generación de productos tóxicos como trihalometanos, haloacéticos, haloacetonitrilo y que sean económicamente asequibles (Vázquez-López *et al.*, 2018).

Para reducir la transmisión de enfermedades por la vía fecal-oral es importante mejorar la calidad del agua y su disponibilidad, así como los sistemas de eliminación de excrementos y la higiene en general (OMS, 2008).

La razón fundamental que afirma la necesidad de desinfectar el agua destinada al consumo humano y uso doméstico es asegurar la inactivación de todos los organismos potencialmente patógenos transmitidos para el hombre. Así, el tratamiento adecuado y la desinfección efectiva del agua, constituyen una intervención fundamental de la salud pública. Para que la desinfección del agua sea apropiada, se debe tener en cuenta la calidad y eficacia del desinfectante, el cual debe reunir ciertos criterios técnicos, como el de ser capaz de destruir o inactivar en un tiempo determinado los microorganismos patógenos presentes en el agua (Vargas, 1998).

La Tabla 1 presenta el funcionamiento de distintas plantas de tratamiento que se encuentran a nivel nacional, las cuáles ocupan diferentes desinfectantes para tratar los organismos anteriormente mencionados.

Tabla 1. Plantas de tratamientos de aguas servidas PTAS rurales a nivel nacional en el año 2012.

Región	Estado de Funcionamiento		
	Bueno	Regular	Malo
Arica y Parinacota	2	2	-
Tarapacá	-	2	1
Antofagasta	4	2	1
Atacama	2	3	1
Coquimbo	36	21	13
Valparaíso	10	6	11
O'Higgins	134	12	23
Maule	62	34	18
Biobío	11	4	5
La Araucanía	-	10	1
Los Ríos	12	5	7
Los Lagos	18	4	3
Aysén	14	1	-
Magallanes	2	-	-
Metropolitana	23	11	19
TOTAL	330	117	103

Fuente: SUBDERE, 2012

De las anteriores PTAS rurales, 328 usan la Cloración como sistema de desinfección, 23 poseen UV y la combinación de ambas tecnologías llega a 4 PTAS. De ese total y al año 2012, la Región del Biobío cuenta con veinte plantas, en donde, 18 poseen Cloración y 2 poseen sistemas Ultravioleta.

Como se había mencionado al año 2012 existían 550 PTAS en sectores rurales (SISS, 2012). Luego de ese catastro sanitario se requirió información sobre nuevos datos más actualizados a la DOH- MOP, utilizando el portal de Transparencia. Sobre esa solicitud de información, se recalca que los datos entregados son parciales, dinámicos y están en constante cambio. Ello debido a la falta de atribuciones que posee la Subdirección de Agua Potable Rural correspondiente a la DOH-MOP.

Sobre la composición del tipo de organización que administra las PTAS del sector rural, los datos proporcionados por la DOH-MOP indican que la mayor parte reside en las APR's, seguido por Villas y proyectos de saneamiento por parte de Municipalidades.

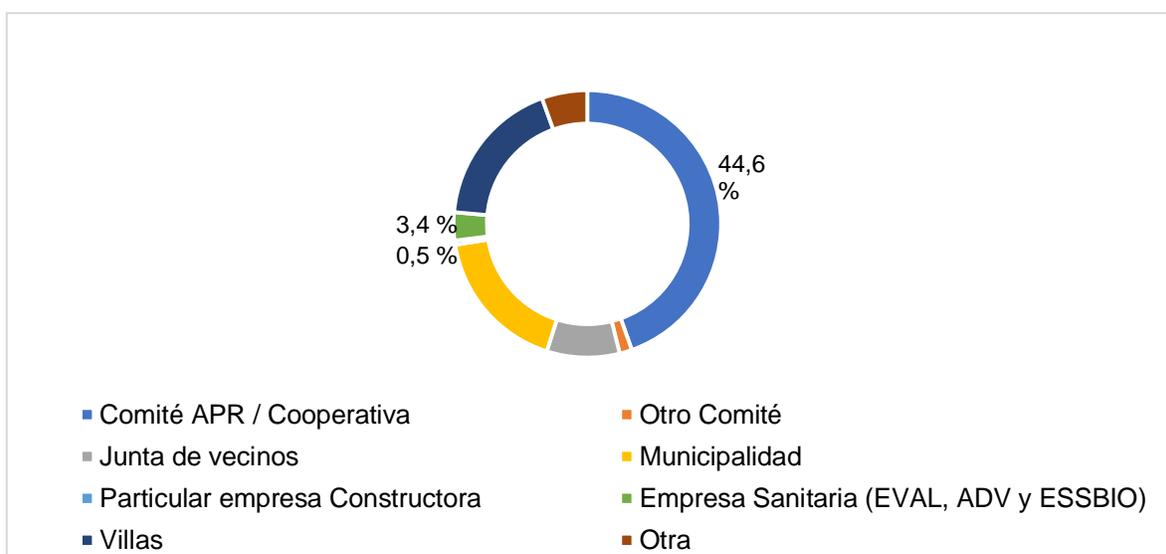


Figura 1. Tipo de organización en la administración de PTAS rurales a nivel nacional.

Fuente: Elaboración propia.

La información obtenida, indica que para el año 2017 objetivamente para organizaciones de APR, existen 204 PTAS para un total de 1806 agrupaciones lo que indica una cobertura 11,0% (MOP-DOH, 2017).

La cifra anterior es bastante desalentadora e indica que es necesaria una gran intervención de infraestructura sanitaria a nivel nacional. La Figura 2 muestra el detalle de APRs con y sin tratamiento por región.

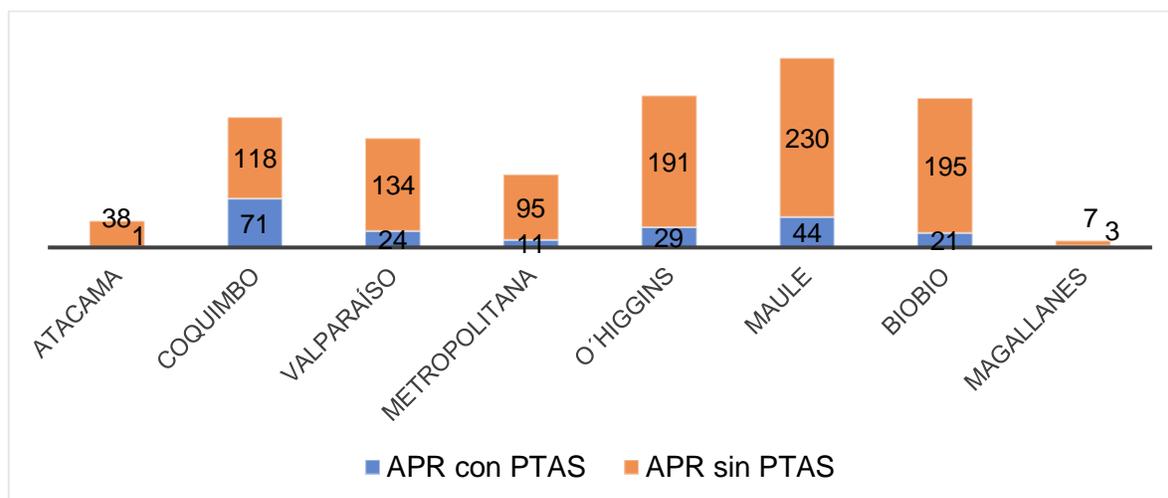


Figura 2. Cobertura de PTAS en APR's a nivel nacional.

Fuente: Elaboración propia.

Con respecto al saneamiento en sectores rurales Rodríguez (2011), indica “se tienen algunas localidades rurales organizadas que tienen resuelto su servicio de abastecimiento de agua potable y cuya administración funciona adecuadamente, por lo que han avanzado en la solución de sistemas de alcantarillado”.

3.2 Alternativas de desinfección

Chan (2018) consigna que “un número de desinfectantes están siendo utilizados en sistemas de desinfección, incluyendo el dióxido de cloro, las cloraminas, el ultrasonido, el ozono y la radiación ultravioleta. Cada tecnología de desinfección tiene diferentes ventajas y limitaciones, pero la factibilidad económica impulsa el uso de la cloración y la radiación UV”.

El ultrasonido ha sido utilizado para homogenizar, desintegrar, desgasificar o limpiar diversos materiales. Además, en la última década se han realizado investigaciones en las que la acción ultrasónica ha demostrado considerables cambios negativos a las bacterias por la cavitación.

La cavitación se produce posterior a la sonicación, ocasionándose simultáneamente fenómenos mecánicos, físicos y químicos que provocan efectos negativos sobre las bacterias y otros microorganismos. El principio de cada uno de estos fenómenos son los siguientes:

Mecánico: Las ondas ultrasónicas tienen zonas de presión positiva y negativa, en las de tipo negativa se crea una burbuja, que con el paso del tiempo tiene un tamaño inestable lo que la lleva a la implosión de la misma, dando lugar a fuerzas cortantes (fuerzas de cizallamiento), que rompen la pared celular, dando como resultado final la salida del material intracelular al medio exterior.

Físico: El incremento de temperatura $>60^{\circ}\text{C}$ altera la permeabilidad de la membrana dando como resultado la salida del material intracelular al medio exterior y la desnaturalización de enzimas y proteínas (Vázquez-López *et al.*, 2018).

Químico: En el medio acuoso se generan reacciones sonoquímicas dando como resultado la generación de radicales H^+ y OH^- , los cuales contribuyen a la oxidación de la pared celular y compuestos intracelular. Como productos finales se tiene H_2O_2 y H_2O , los cuales no son considerados tóxicos, además, que el primero sigue siendo un compuesto oxidante (Wang *et al.*, 2005).

Cabe mencionar que los efectos arriba descritos no son exclusivos para los microorganismos. Si en el agua residual también se tienen moléculas orgánicas como proteínas y fosfolípidos (expresadas como nitrógeno y fósforo total respectivamente) y formas reducidas como el nitrógeno amoniacal, la cavitación puede oxidar las moléculas a CO_2 , H_2O y H_2O_2 y los nutrientes a sus formas NO_3 y PO_4 . Todo esto contribuye a reducir más los niveles de DQO, DBO_5 y NTK, lo cual obedece a aprovechar las aguas residuales como posible recurso para uso y consumo humano (Vázquez-López *et al.*, 2018).

Destacando aún más la importancia de la desinfección Hua (2010) establece “La desinfección es un proceso vital para inactivar microorganismos patógenos en el agua potable y aguas residuales, pero desde la década de 1970 ha sido reconocido que la desinfección puede producir daños por los subproductos y causar problemas de salud”.

3.2.1. Desinfección por Cloro

El desinfectante más común para el tratamiento de aguas residuales es Cloro, debido a su efectividad contra una amplia gama de organismos patógenos y su costo relativamente bajo. Sin embargo, debido a diferentes investigaciones se logró clarificar que la practicidad y seguridad de este sistema de desinfección es discutible. Chang (2018) afirma “si el cloro reacciona con la materia orgánica, la concentración de cloro se reduce y se forman productos de desinfección (DBP's por su sigla en inglés) incluyendo los trihalometanos (THM)”.

En la última década la Agencia de Medio Ambiente de Estados Unidos, EPA (por sus siglas en inglés), empezó a limitar las descargas que contengan trihalometanos. Todas estas restricciones implican altos costos de manejo y más aún que luego de un proceso de Cloración en una PTAS, debe existir un proceso de Decloración previo a la descarga. En la decloración se utiliza Dióxido de azufre, compuesto corrosivo y peligroso de manejar para los operarios de las plantas.

Según afirma Chen et al. (2013) que, al regar con agua con estas características, se espera que los contaminantes sean absorbidos por el suelo y degradados por microorganismos, sin embargo, la naturaleza química de estos compuestos varía enormemente. En general, no existe suficiente información técnica para evaluar los posibles efectos adversos de estos contaminantes en este ámbito”. También añade, “además, de ser preocupante la presencia de DBP's en la reutilización de aguas servidas desinfectadas con cloro, existe otra limitación con este desinfectante, ya que no inactiva completamente a patógenos como Giardia y virus, los cuales pueden resistir a la cloración”.

Problemas asociados con esta tecnología son generación de subproductos tóxicos, alto mantenimiento y falta de control sobre el grado de cloración. Cuando se descuidan las unidades de cloración, no se concretará la desinfección (Richter & Weaver, 2008).

Los subproductos de desinfección, se forman a partir de la interacción de la materia orgánica natural (NOM abreviado en inglés) y cloro utilizado para la desinfección. El parámetro NOM, es medido en ensayos mediante COT o carbono orgánico total.

DBP's se han relacionado con un mayor riesgo de ciertos cánceres y efectos reproductivos adversos. THM) y ácidos haloacéticos (HAA) son los dos grupos más abundantes de DBP conocidos (Hua & Yeats, 2010). DBP's incluyen cloroformo, bromodiclorometano, clorodibromoclorometano, bromoformo y ácido Dicloro acético. Estos compuestos que pueden causar problemas al riñón, hígado y al sistema nervioso central, como se muestra en la Tabla 2. Por último, el cloroformo es el más frecuente y es considerado altamente cancerígeno.

Sintetizando, la cloración es un procedimiento a pequeña y mediana escala, inseguro y con subproductos que sin los procedimientos adecuados pueden originar repercusiones en los humanos y el medio ambiente.

Tabla 2. Efectos sobre la salud de algunos subproductos de la desinfección de cloro.

Subproducto	Efectos sobre la salud
Bromoformo	Baja incidencia de tumores intestinales en ratas.
Cloroformo	Puede inducir tumores de hígado en ratones y tumores de riñón en ratas
Bromodiclorometano	Ocasiona daños en el hígado y el riñón en ratones y ratas. Carcinogénica en ratones y ratas. Produce tumores intestinales, hepáticos y renales
Clorodibromometano	Produce daños en el hígado y el riñón en ratones y ratas. Induce tumores en el hígado de ratones.
Ácido cloroacético	Efectos neurológicos en animales. Sin aumento de tumores
Ácido dicloro acético	Tóxico y con daños en el sistema nervioso y el hígado.
Ácido tricloroacético	Inductor potente de tumores hepáticos en ratones macho.
Dicloro acetonitrilo	Efectos toxicológicos específicos reportados, sólo efectos no específicos sobre el peso corporal y algunos pesos de los órganos y algunos efectos reproductivos.

Fuente: Adaptada de Bull, 1982.

3.2.2 Desinfección por Ultravioleta

La luz ultravioleta (UV) es una forma de luz invisible al ojo humano. Ocupa la porción del espectro electromagnético situada entre los rayos X y la luz visible. El sol emite luz ultravioleta, sin embargo, la capa de ozono terrestre absorbe gran parte de ella. UV se utilizó por primera vez en 1916 para desinfectar el agua potable en Henderson, Kentucky, pero luego fue abandonado en favor de la cloración. Debido a las mejoras en la tecnología, este desinfectante ahora está recuperando popularidad (Bitton, 2014).

Una característica única de la luz UV es que un intervalo específico de sus longitudes de onda (el comprendido entre los 200 y los 300 nanómetros) se clasifica como germicida, es decir, puede inactivar microorganismos como bacterias, virus y protozoos, el detalle del tramo germicida de la luz UV se detalla en la Figura 3. Esta capacidad ha permitido la adopción generalizada de la luz UV como una forma sustentable con el medio ambiente, sin sustancias químicas y muy eficaz para desinfectar y proteger el agua frente a microorganismos dañinos para la salud humana y para el medio ambiente. Todas estas características han desencadenado en que la desinfección ultravioleta se ha transformado en una alternativa ideal frente a las otras tecnologías.

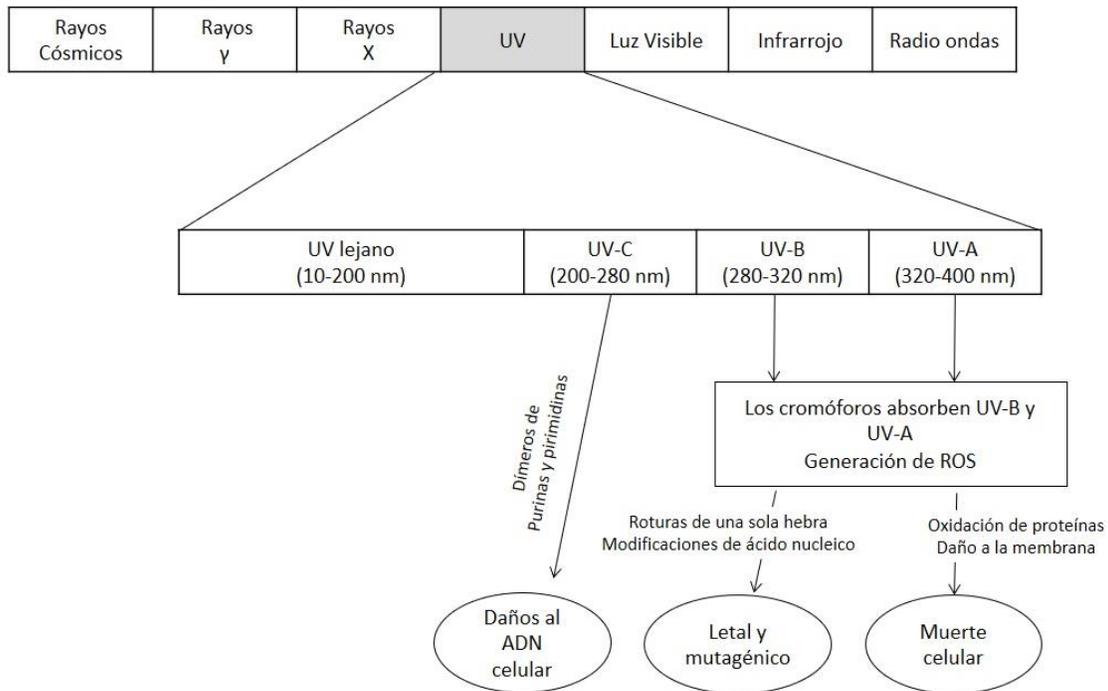


Figura 3. Efectos de la radiación UV en las células.

Fuente: Malato et al. (2009)

Debido a la mayor investigación y experimentos efectuados sobre la producción de subproductos de oxidación durante la cloración y también la ozonización, la desinfección por irradiación Ultravioleta obtuvo mayor diversificación. La bombilla o lámpara de baja presión UV casi no produce subproductos.

3.3 Análisis de UV como desinfectante seleccionado

A diferencia de los métodos químicos para la desinfección de aguas, la luz UV proporciona una inactivación rápida y eficiente de los microorganismos mediante un proceso físico. Cuando las bacterias, los virus y los protozoos se exponen a las longitudes de onda germicidas de la luz UV, se vuelven incapaces de reproducirse e infectar.

Ventajas:

- La desinfección con luz UV es eficaz para la desactivación de la mayoría de los virus, esporas, quistes y protozoos.
- La desinfección con luz UV es un proceso netamente físico que en comparación a la desinfección química elimina la necesidad de generar, manejar, transportar o almacenar productos químicos tóxicos y corrosivos implicando mayores costos y peligros al ambiente.
- No existe un subproducto residual que pueda afectar a los seres humanos o cualquier organismo acuático.
- La desinfección con luz UV es de uso fácil para los operadores.
- La desinfección con luz UV tiene un período de contacto más corto en comparación con otros desinfectantes (aproximadamente de 20 a 30 segundos con la utilización de las lámparas de baja presión).
- El equipo de desinfección con luz UV requiere menos espacio que otros métodos.

Desventajas:

- Algunas veces los organismos pueden reparar o invertir los efectos destructivos de la radiación UV mediante un “mecanismo de reparación”, también conocido como foto reactivación o, en ausencia de radiación, como “reparación en oscuro” pero esta auto-reparación es casi mínima.
- Es necesario un programa de mantenimiento preventivo para controlar la acumulación de sólidos en la parte externa de los tubos de luz.
- La turbidez y los sólidos suspendidos totales (SST) en aguas residuales hacen que la desinfección con irradiación UV sea ineficaz. El uso de la desinfección con lámparas UV de baja presión no es tan efectivo en el caso de efluentes secundarios con niveles de SST mayores a 30 mg/L.

- La desinfección con luz UV no es tan económica como la desinfección con cloro, pero los costos son competitivos cuando la cloración requiere decoloración y se cumple con los códigos de prevención de incendios.
- Una desventaja importante también es la que señala Bitton (2014) y es que “no hay desinfectante residual en el agua tratada lo que implicaría la formación de biopelículas en la superficie de la lámpara UV” (p.77). Lo que supone esta situación es condiciones específicas.

3.4 Mecanismo de desinfección UV

A diferencia de los métodos químicos de desinfección de aguas, la radiación UV proporciona una inactivación rápida y eficiente de los microorganismos mediante un proceso físico. Cuando las bacterias, los virus y los protozoos se exponen a las longitudes de onda germicidas de la luz UV, se vuelven incapaces de reproducirse e infectar. Se ha demostrado que la luz UV es eficaz frente a microorganismos patógenos, como los causantes del cólera, la polio, la fiebre tifoidea, la hepatitis y otras enfermedades bacterianas, víricas y parasitarias.

Los microorganismos se desactivan por medio de la luz UV como resultado del daño a los ácidos nucleicos. El ADN y el ARN celular absorben la energía alta asociada con la energía UV de longitud de onda corta, principalmente a 254nm. Esta absorción de energía UV forma nuevos enlaces entre nucleótidos adyacentes creando dobles enlaces o dímeros. La dimerización de las moléculas adyacentes, especialmente de las timinas, constituye el daño fotoquímico más frecuente. La formación de numerosos dímeros de timina en el ADN de bacterias y virus impide la replicación y la capacidad de infectar (Metcalf & Eddy, 2007).

Un importante conjunto de investigaciones científicas ha demostrado la capacidad de la luz UV para inactivar una extensa lista de bacterias patógenas, virus y protozoos. La luz UV ofrece una ventaja clave sobre la desinfección con cloro, ya

que puede inactivar protozoos perjudiciales para la salud de la población (destacan *Cryptosporidium* y *Giardia*).

Es posible que algunos microorganismos reparen el daño fotoquímico causado por la luz UV, si su dosis es demasiado baja, mediante la fotorreactivación o reparación oscura. De hecho, se ha mostrado que algunos microorganismos, como *Cryptosporidium*, no presentan ningún signo indicativo de reparación en condiciones luminosas y oscuras, tras la exposición a una lámpara UV de presión baja o media irradiando una dosis de tan solo 3 mJ/cm². Los sistemas UV deben diseñarse con una dosis de radiación UV suficiente como para garantizar que el daño celular no pueda ser reparado.

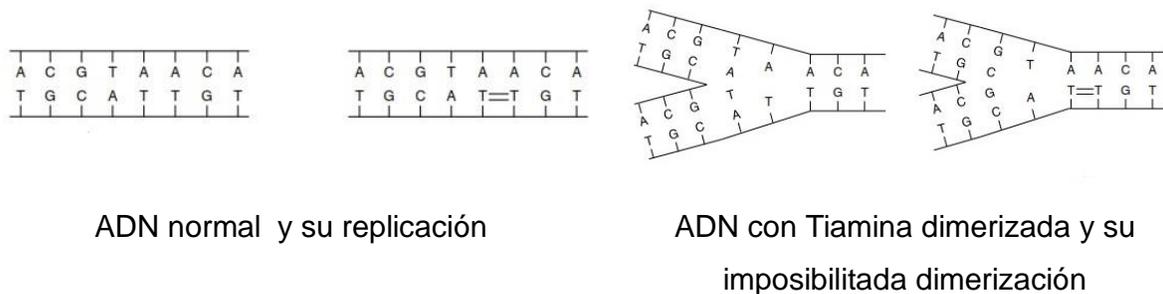


Figura 4. Formación de dobles enlaces en microorganismos expuestos a la radiación ultravioleta.

Fuente: Metcalf & Eddy (2007).

La Tabla 3 indica que, salvo contadas excepciones, la dosis de inactivación de bacterias patógenas es muy similar a las dosis requeridas para la desinfección de grupos de indicadores fecales, como los coliformes fecales. También se establece los valores necesarios para la inactivación en Virus, Protozoos y Levaduras.

Tabla 3. Dosis UV en mJ/cm² para inactivar una población microbiana en 1 Log (90%) y 2 Log (99%).

MICROORGANISMOS	REDUCCIÓN LOGARITMICA		MICROORGANISMOS	REDUCCIÓN LOGARITMICA	
	1	2		1	2
BACTERIAS			<i>Coliformes fecales</i>	3,4	6,8
<i>Bacillus anthracis</i>	4,5	8,7	<i>Salmonella enteritidis</i>	4	7,6
<i>Bacillus subtilis</i> , esporas	12	22	<i>Salmonella paratyphi</i>	3,2	-
<i>Bacillus subtilis</i>	7,1	11	<i>Salmonella typhi</i>	2,1	-
<i>Campylobacter jejuni</i>	1,1	-	<i>Salmonella typhimurium</i>	3	-
<i>Clostridium tetani</i>	12	22	<i>Shigella dysenteriae</i>	2,2	4,2
<i>Corynebacterium diphtheriae</i>	3,4	6,5	<i>Shigella flexneri</i> (<i>paradysenteriae</i>)	1,7	3,4
<i>Escherichia coli</i>	3	6,6	<i>Shigella sonnei</i>	3	5
<i>Klebsiella terrigena</i>	2,6	-	<i>Staphylococcus aureus</i>	5	6,6
<i>Legionella pneumophila</i>	0,9	2,8	<i>Streptococcus faecalis</i>	4,4	-
<i>Sarcina lutea</i>	20	26,4	<i>Streptococcus pyogenes</i>	2,2	-
<i>Mycobacterium tuberculosis</i>	6	10	<i>Vibrio cholerae</i> (<i>V.comma</i>)	-	6,5
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	5,5	10.5	<i>Yersinia enterocolitica</i>	1,1	-
VIRUS					
MS-2 Coliphage	18,6	-	Virus de la influenza	3,6	6,6
F-specific bacteriophage	6,9	-	Virus de la poliomeilitis	5-8	14
Hepatitis A	7,3	-	Rotavirus	6-15	15-40
PROTOZOARIOS			ALGAS		
<i>Giardia lamblia</i>	82	-	Verde-Azul	300	600
<i>Cryptosporidium parvum</i>	80	120	<i>Chlorella vulgaris</i>	12	22
LEVADURAS					
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	7,3	13,2			

Adaptado de Wright y Cairns (2004).

3.4.1 Reparación de daño UV

Bitton (2014) establece que “El daño causado por la radiación UV puede ser reparado por microorganismos, utilizando dos procesos de reparación de ADN, reparación por escisión de nucleótidos (también llamada reparación oscura) y fotorreactivación que requiere luz visible”.

3.5 Factores en el diseño de un sistema UV

Para desarrollar una comprensión de la aplicación de UV para la desinfección de agua regenerada para la reutilización, es necesario tener en cuenta los siguientes principios: fuente de radiación UV, configuraciones del sistema UV, la efectividad germicida de irradiación UV, modelar el UV proceso de desinfección, estimación de la dosis de UV, pautas de desinfección ultravioleta, análisis de un sistema de desinfección UV, problemas operacionales con sistemas UV y el medio ambiente.

Cuando se usan para la desinfección de agua regenerada, las mangas de cuarzo se utilizan para aislar las lámparas UV del contacto directo con el agua y controlar la temperatura de la pared de la lámpara almacenando las temperaturas extremas a las que están expuestas las lámparas UV, manteniendo así una salida de luz UV bastante uniforme. La salida de los sistemas de desinfección UV también disminuye con el tiempo debido a una reducción en el grupo de electrones dentro de la lámpara UV, el deterioro de los electrodos y el envejecimiento del manguito de cuarzo.

Las principales lámparas de tipo electrodo utilizadas para producir radiación UV (o luz) se dividen en tres categorías basadas en los parámetros operativos internos: baja presión, baja intensidad, baja presión alta intensidad y presión media alta intensidad.

Tabla 4. Características típicas operativas para lámparas UV.

Ítem	Unidad	Tipo de lámpara		
		Baja presión Baja intensidad	Baja presión Alta intensidad	Mediana presión Alta intensidad
Consumo de energía	W	40–100	200–500	1000 a 10000
Corriente de la lámpara	-	350-550	Variable	Variable
Voltaje de la lámpara	V	220	Variable	Variable
Salida / entrada germicida	%	30 a 40	25 a 35	10 a 15
Salida de la lámpara a 254 nm	W	25-27	60 -400	
Temperatura de lámpara operando	°C	35-50	60-100	600-900
Presión	mm Hg	0,007	0,01-0,8	10 ² -10 ⁴
Longitud de la lámpara	M	0,75-1,5	Variable	Variable
Diámetro de la lámpara	mm	15-20	Variable	Variable
Vida de la manga	años	4 a 6	4 a 6	1 a 3
Vida del lastre	años	10 a 15	10 a 15	1 a 3
Duración estimada de la lámpara	h	8000 a 12000	7000 a 10,000	3000 a 8000

Fuente: Metcalf & Eddy (2007).

Siendo la lámpara más utilizada la de baja presión y alta intensidad, de acuerdo a sus prestaciones: alto poder germicida y real eficacia a 254 nm, duración de vida mucho más prolongada (Hidro UV). No obstante, se requieren varias lámparas para aplicaciones. Esta última lámpara será la utilizada en el estudio y en el sistema de desinfección.

3.5.1 Lámparas UV de baja intensidad y baja presión

Los sistemas de desinfección UV generalmente utilizan lámparas de mercurio (lámparas LP o MP) encerradas en tubos de cuarzo. Los tubos se sumergen en agua que fluye en un tanque y permiten el paso de la radiación ultravioleta (Bitton, 2014).

Las lámparas UV de alta presión y baja presión son similares a las de baja presión y baja intensidad lámparas con la excepción de que se usa una amalgama de mercurio e indio en lugar de mercurio. El uso de la amalgama de mercurio permite una mayor producción de UV-C, por lo general, de dos a cuatro veces el rendimiento de las lámparas convencionales de baja intensidad. La amalgama en las lámparas UV de baja intensidad de alta presión se usa para mantener un nivel constante de átomos de mercurio y proporciona mayor estabilidad en un amplio rango de temperaturas y una mayor vida útil de la lámpara (25 por ciento más que otras lámparas de baja presión). La literatura actual del fabricante debe revisarse para las especificaciones de la lámpara a medida que se desarrollan continuamente nuevas lámparas de alta intensidad de baja presión (Metcalf & Eddy, 2007).

Tabla 5. Ventajas operativas de la lámpara de vapor de mercurio.

Baja presión y Alta potencia	Presión media
Mayor eficiencia germicida; casi toda la salida es a potencia 254 nm	Mayor potencia de salida
Menor consumo de energía por lámpara (menor reducción de la dosis si falla la lámpara)	Menor cantidad de lámparas para una aplicación dada
Vida de la lámpara más alta	

Fuente: Adaptación de EPA, 2006

3.5.2 Sistemas de desinfección de canal abierto

La colocación de la lámpara puede ser horizontal y paralela al flujo o vertical y perpendicular al flujo. Cada módulo contiene una cantidad específica de lámparas UV revestidas con fundas de cuarzo. El número total de lámparas es específico para cada aplicación, pero el número de lámparas en cada módulo depende de la configuración del canal y del fabricante de la lámpara. Un espacio de 75mm entre los centros de lámparas UV es actualmente el más utilizado por los fabricantes de UV. Una compuerta de aleta ponderada, un vertedero de cresta afilado extendido o un controlador de nivel automático se utilizan para controlar la profundidad de flujo a través de cada canal de desinfección. El control de nivel es esencial para mantener la sumersión de las lámparas en todo momento. Cada canal contiene típicamente dos o más bancos de lámparas UV en serie y cada banco se compone de varios módulos (o bastidores de lámparas UV). Es importante tener en cuenta que normalmente se proporciona un banco o canal en espera para la confiabilidad del sistema.

El índice de flujo del diseño generalmente se divide por igual entre una cantidad de canales abiertos.

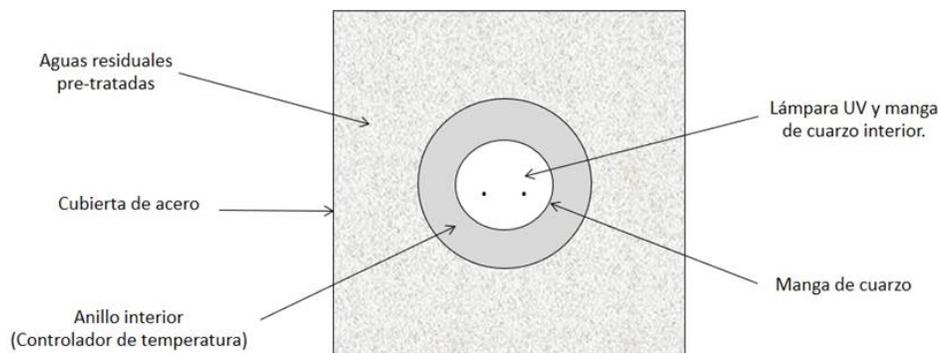


Figura 5. Vista en sección transversal de un reactor UV de Canal Abierto.

Fuente: Elaboración propia.

3.5.3 Componente Hidráulico

Un sistema de desinfección UV idealmente debe tener flujo en estado estacionario con la suficiente mezcla radial para maximizar la exposición a la radiación UV. Los procesos aguas arriba y aguas abajo se deben considerar para la evaluación hidráulica. El fluido debe tener características de un flujo laminar al ser expuesto a la radiación UV, al contrario de un flujo turbulento que tiene menos exposición por área o menos tiempo de contacto. Por lo tanto, es importante conocer la velocidad y caudal de los puntos de entrada (inlet) y de salida (outlet).

3.6 Esquema de una instalación de SP-UV

El siguiente diagrama muestra las principales unidades que debe tener un sistema de desinfección por luz ultra-violeta. En primer lugar, ser parte por la recolección a través de un pozo de acumulación de los efluentes del tratamiento secundario. Luego este flujo es bombeado hasta un estanque que tiene por objetivo regular el caudal que pasara a través de la cámara desgrasadora y el filtro de malla.

Los anteriores tres componentes ayudan a que el flujo sea de características laminar y así tenga el tiempo de contacto necesario para que la inactivación de los microorganismos patógenos se concrete.

Finalizada la desinfección, se da paso al sistema de conducción al destino final del fluido desinfectado esto contempla una cámara de recepción y una bomba centrífuga.

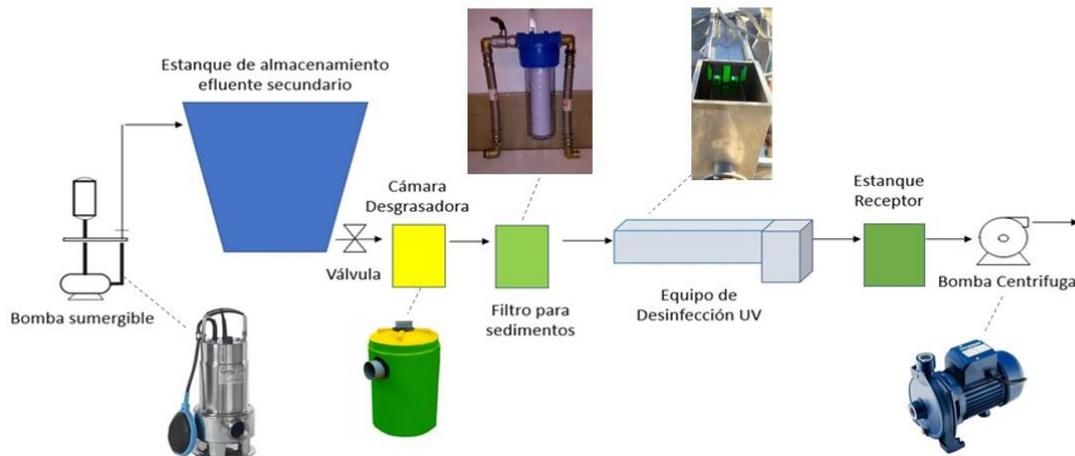


Figura 6. Diagrama de Sistema Piloto de Desinfección UV.

Adaptado de Véliz (2018)

3.7 Problemas de partida y mantenciones

Entre los aspectos que es necesario revisar para la puesta en marcha de un sistema piloto de desinfección ultravioleta, son las variables de Sólidos Suspendedos totales y Turbiedad. Carré et al. (2018) demostró que las partículas grandes afectan la desinfección UV en dos niveles principales: dispersan la luz ultravioleta y protegen a las bacterias dentro de sus núcleos compactos. También añade, que la asociación de partículas y microorganismos está regulada por la "Teoría de doble capa", afirmando que la atracción opera en dos niveles en torno a la partícula: la "zona de energía secundaria" (5-10 nm de la superficie de la partícula) donde la atracción es reversible; y la "zona de energía primaria" (1nm de la superficie de la partícula) donde la atracción es irreversible. Este mecanismo está influenciado por varios factores, el principal es el tamaño de partícula. Las bacterias tienen mayor atracción a partículas de más de 10 μ m, mientras que los virus pueden estar asociados con partículas más pequeñas (menos de 2 μ m). Lo que implica esta asociación entre los SST y la turbidez.

La desinfección es más exitosa con agua de baja turbidez y SST, porque los sólidos pueden absorber la radiación y bloquea su camino para alcanzar las bacterias diana. Turbidez sobre 12 unidades de turbidez nefelométricas (NTU) y sólidos en suspensión por encima de 50mg /L alteran de forma perjudicial la absorbancia UV y una correcta desinfección (Richter & Weaver ,2008).

La asociación de partículas y microorganismos está regulada por la teoría de doble capa, afirmando que la atracción opera en dos niveles alrededor de la partícula: la "zona de energía secundaria" (5-10nm de la superficie de la partícula) donde la atracción es reversible; y la "zona de energía primaria" (1nm de la superficie de la partícula) donde la atracción es irreversible. Este mecanismo está influenciado por varios factores, el principal es el tamaño de partícula. Las bacterias se asocian generalmente con partículas de más de 10 μ m, mientras que los virus pueden estar asociados con partículas más pequeñas (menos de 2 μ m).

3.8 Condiciones de operación

Según los fabricantes de equipos de desinfección UV, los parámetros de funcionamiento son:

- Turbidez (máxima): 5 NTU
- Sólidos Suspendidos Totales (máximos): 30 mg/L

Por ello es necesario la instalación de Filtros previos entre el almacenamiento del efluente del tratamiento secundario y el reactor. También es necesario realizar un constante monitoreo de los parámetros previamente mencionados, así como evitar la intromisión de partículas externas que vayan a caer al flujo de agua.

Otro punto de interés y que Pizarro (2012) constató en terreno fue que en tres plantas que utilizan la irradiación UV como tratamiento, es el descuido en la reposición de las lámparas UV en donde la presencia de uno de estos elementos afecta inmediatamente la desinfección e impide los posteriores reúsos para las comunidades.

La figura 7 muestra tres PTAS, con situaciones similares. La primera Planta posee un tratamiento por Lodos Activados, mientras las dos últimas poseen el sistema de Lombifiltro o Sistema Tohá.

En la mayoría de las fotografías es posible distinguir un efluente clarificado, por lo cual es posible aseverar una correcta desinfección a excepción de C y D, donde se aprecia material particulado de gran magnitud constituido de lombrices y viruta.

El último caso E y F, se aprecia una ligera turbidez. Factor también incidente en una correcta desinfección UV que Pizarro (2012).

En todos los casos anteriores el efluente desinfectado es usado en regadío o se destina a acequias colindantes.



Figura 7. Sistema de desinfección UV de PTAS ubicadas en: A) y B). Sector el Maitén, Isla de Maipo. Región Metropolitana; C) y D). Villa Peter Horn. Putaendo, región de Valparaíso; E) y F). Colegio de Villa La Compañía. Graneros, región de O'Higgins.

Fuente: Pizarro (2012).

En base a las descripciones anteriores, es necesario fijar mantenciones con periodicidad de un mes al estado de los Lámparas UV, revisar su estado y la generación de películas en torno a las fundas. El flujo dentro del canal abierto debe estar siempre cerrado y este debe ser revisado por lo menos cada 15 días para evitar la acumulación de material particulado.

4. METODOLOGÍA

4.1. Área de estudio

El área de estudio corresponde a una sección acoplada al extremo Oeste del proyecto “Sistema Piloto de Humedales Construidos PTAS- Hualqui” perteneciente al grupo de investigación GIBA- UdeC (Sepúlveda-Mardones *et al.*, 2017)

Estas instalaciones se encuentran inmersas en el área correspondiente a la Planta de Tratamiento de Aguas Servidas (PTAS) propiedad de la empresa ESSBIO S.A. de la ciudad de Hualqui en la Región del Biobío (Figura 8)



Figura 8. Ubicación de Planta de Tratamiento de Aguas Servidas, Planta Piloto HFSS y nueva unidad de Desinfección UV. ($36^{\circ}59'26.93''$ latitud sur y $72^{\circ}56'47.23''$ de longitud oeste).

Fuente: Google Earth; Digital Globe 2018.

4.1.1 Características de las unidades de HFHSS

El humedal construido, consta de seis celdas donde cada celda posee un área superficial de 4,5 m², un volumen total de 1,28 m³ y una profundidad cercana a los 0,4 m. Estas unidades son paralelas y se encuentran bajo configuración de humedal de flujo horizontal subsuperficial (Rojas *et al.*, 2013; Vidal & Hormazabal, 2018).

Las Celdas están compuestas por diferentes especies de plantas depuradoras y ornamentales, que se ajustan de acuerdo a este orden: Celdas 1 y 3 contienen *Phragmites australis*, Celdas 2 y 4 *Schoenoplectus californicus*, Celda 5 *Zantedeschia aethiopica* y *Cyperus papyrus*. Finalmente, la celda 6 contiene únicamente *Cyperus papyrus*.

En su construcción se utilizó como medio de soporte a la grava con un diámetro que fluctúa entre los 3/4"-1" y un Tiempo de Retención Hidráulica desde los 3 a 9 días, que función de acuerdo a la cantidad de agua suministrada (Acevedo, 2015).

La planta piloto cuenta con alimentación, un influente extraído después del pre-tratamiento de la PTAS. Esta alimentación pasa por el tratamiento primario de la planta: tanque desarenador, fosa séptica y tanque de bombeo, para luego llegar a un tanque de distribución que se encarga de repartir en influente a las seis celdas. (Núñez, 2017).

Las Figuras 9 A y B, muestran las vistas Sur y Noroeste del proyecto del Humedal Construido, previo a la instalación en abril de 2017.



Figura 9. A). Vista Sur Este de la planta piloto; B). Vista Noroeste de la planta piloto.

Fuente: Imágenes propias

4.2 Instalación de Sistema Piloto-UV

La Unidad de Desinfección Ultra-violeta está constituida por dos partes, la primera se relaciona al Equipo de desinfección UV y la segunda a todos los componentes que permiten el desplazamiento del efluente que proviene desde el HFSS hacia el reactor, sumado a los componentes que permiten la extracción y desplazamiento fuera del Equipo UV de vuelta a la piscina de lodos de la PTAS- Hualqui.

Se esbozó tres áreas tentativas donde posiblemente se podría instalar la unidad, según la Figura 10. Así, se eligió el Sitio 1 que permite una mayor cercanía con la conexión hacia la laguna de lodos. Los sitios 2 y 3 se desestimaron debido a que podrían ocasionar problemas en el desplazamiento hacia los sectores de la PTAS por parte de la empresa ESSBIO.

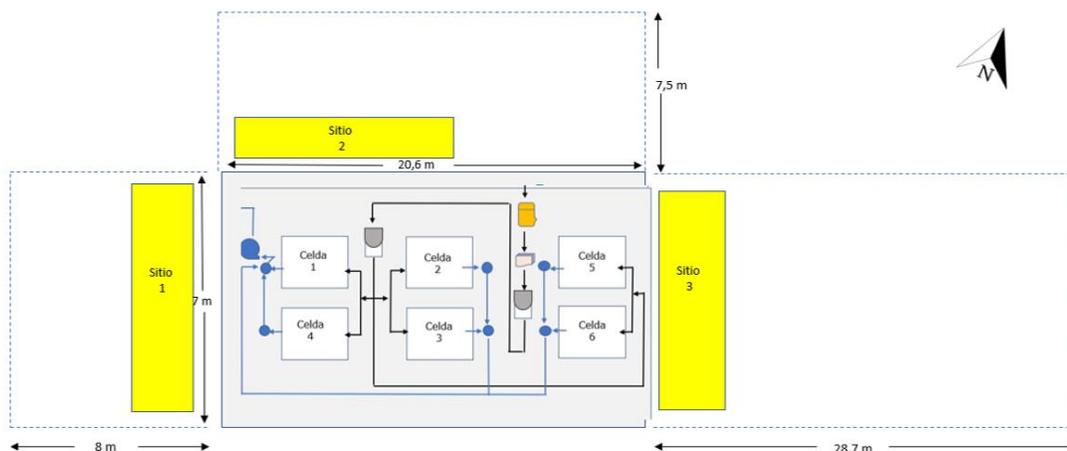


Figura 10. Sitios tentativos para la ubicación de la Sistema Piloto-UV

Fuente: Elaboración propia.

Una vez designado el lugar, se procedió a medir el área destinada al equipo y los componentes externos.



Figura 11. A). Vista Oeste de la planta piloto y lugar elegido para instalar SP-UV;
 B). Mediciones para delimitar área de SP-UV
 Fuente: Imágenes propias

La instalación de los componentes del sistema piloto UV, tuvo una duración de 7 días (no continuos) aproximadamente durante un periodo de 3 meses.

4.2.1 Descripción de equipos cotizados para la SP-UV

Se realizaron diferentes cotizaciones para los equipos que componen equipo con el objetivo que se ajustaran óptimamente al sistema pre-establecido.

Para el equipo de reactor UV se solicitó asesoría técnica a la empresa “Filtro aguas”, que sugirió el modelo HO UV30-187OC (Figura 12 A) un reactor UV del tipo “canal abierto” y para la lámpara Ultra Violeta se eligió el modelo LAMPARA UV c: GHO36T5L 87W (Figura. 12 B) (compatible con el equipo previamente mencionado).

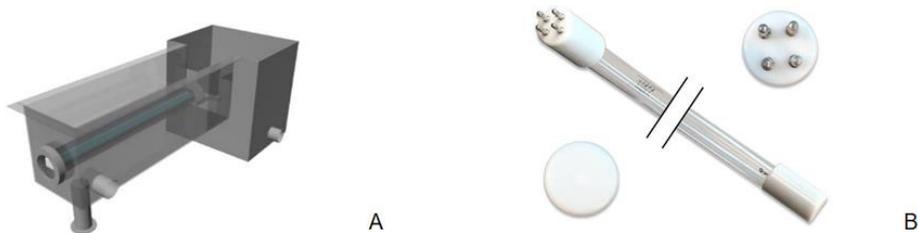


Figura 12. A. Representación digital Reactor UV modelo HO UV30-187OC; B. Lámpara UV c: GHO36T5L 87W.
 Fuente: Hidro UV (2017)

Las Tablas 6 y 7 agrupan las especificaciones técnicas de los equipos descritos.

Tabla 6. Especificaciones Técnicas de Reactor UV modelo HO UV30-1870C.

Ítem	Detalle
Material	Acero Inoxidable de 304 L
Caudales máximos de Funcionamiento	1,5 m ³ /h con 25% transmitancia del agua. 2,0 m ³ /h con 35% transmitancia del agua.
Potencia de desinfección del equipo con lámpara UV	30 mJ/cm ²
Tipo de flujo	Gravitacional implicando un flujo laminar
Tipo de conexiones	Entradas y salidas en 1 pulgadas
Alimentación Eléctrica	220 volts
Dimensiones de Equipo	Largo: 1200 mm / Alto: 250 mm / Ancho: 250 mm.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7. Especificaciones Técnicas de Lámpara UV GHO36T5L 87W.

Ítem	Detalle
Tipo	Lámpara UV de baja presión y alta intensidad (LPHO). De un solo extremo y 4 pines
Material	Vidrio de cuarzo y base de cerámica.
Diámetro de Lámpara	15 mm
Voltaje	220 V
Potencias de entrada y salida	Entrada: 87 W ; Salida:28 W obteniendo un peak de 253 nm
Vida útil media	9000 horas

Fuente: Elaboración propia.

Para las conexiones se plantea la utilización de una Electro Bomba Sumergible que cuente con 0,5 HP de potencia y que sea compatible con aguas ligeramente cargadas, esta bomba tendrá como función extraer las aguas tratadas provenientes desde el pozo de almacenamiento ubicado en la salida de la planta piloto. Con los requerimientos antes mencionado se sugiere una bomba marca Bomba Zenit modelo DR BLUE 50-2-G32V-M (Figura 13 A).

Luego de ser extraída por una bomba habrá un estanque vertical de 650 Litros, el cual estará a una altura superior a los equipos que lo secundan para que, por medio de la gravedad se genere el escurrimiento a una velocidad constante y sin aumentos violentos de caudal. Se solicita un estanque de la capacidad establecida, fabricado en polietileno, modelo EVS-650 de la marca InfraPlast (Figura 13 B).

A continuación, es necesaria una cámara desgrasadora, que tienen por objetivo remover las grasas que aún persisten luego del paso por el HFSS y también previene que esas grasas dañen el reactor UV y su mecanismo de desinfección. Se utilizará una cámara desgrasadora Bioplastic modelo DES0100 (Figura 13 C) y fabricada en Polietileno. Esta cámara asegura la permanencia del influente por 30 minutos dentro de ella, con el objeto de asegurar mejor su función y cumplir con la norma establecida.



Figura 13. A). Bomba sumergible Zenit modelo DR BLUE 50-2-G32V-M; B). Estanque Infraplast modelo EVS-650; C). Cámara desgrasadora Bioplastic modelo DES0100.

Fuente: Proservices InfraPlast, Bio Plastic

4.3 Descripción del proceso de desinfección en la SP-UV

El proceso inicia con la bomba que extrae las aguas tratadas hacia un estanque de almacenamiento que tiene como función regular el caudal de entrada hacia los posteriores elementos del proceso. Una vez puesta en marcha la bomba y con el agua almacenada en el estanque este fluido pasa a una cámara desgrasadora que filtra y retiene las grasas que aún persisten de los procesos desarrollados en el HFSS. Una cantidad de grasas en el sistema implica un malfuncionamiento de este dónde podría ocurrir fenómenos de impermeabilización en las tuberías.

Una vez decantada, el agua tratada esta entra al reactor UV, que es un equipo de marca HIDRO-UV, modelo HO UV30-1870C. En ella se desarrollan las reacciones fotoquímicas necesarias para desactivar el ADN de los microorganismos patógenos impidiendo su posibilidad de reproducción y por ende su neutralización.

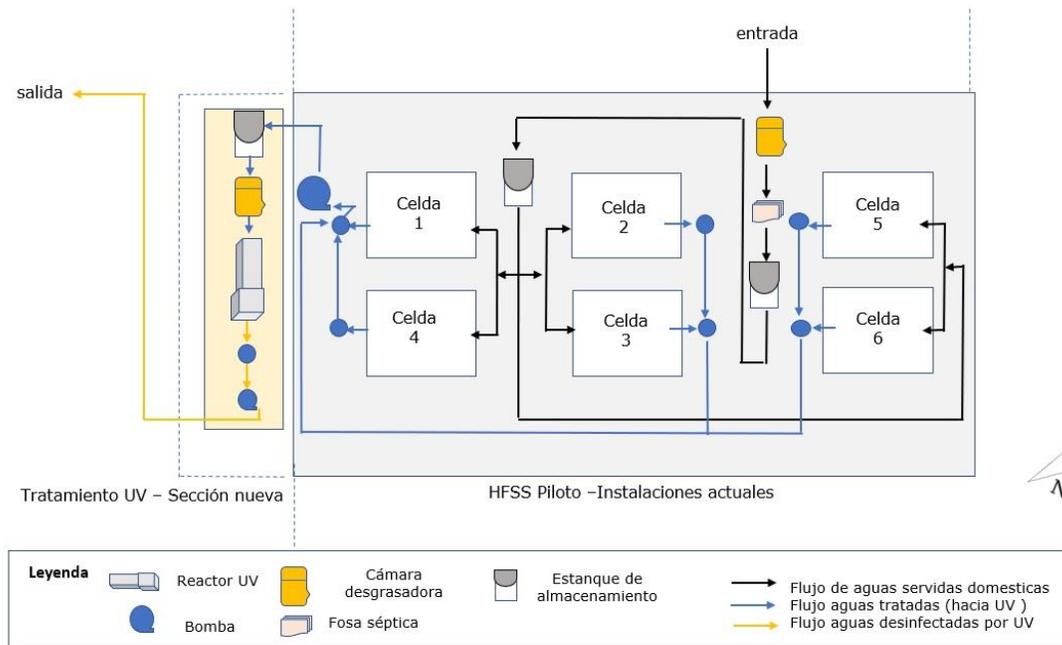


Figura 14. Esquema de Humedal construido y unidad piloto de desinfección UV.
Fuente: Elaboración propia

4.4 Obtención de las muestras a analizar en los puntos de control

Se consideró evaluar la desinfección tomando dos puntos de control. El primero previo a la desinfección y el siguiente una vez realizado ese proceso en el estanque de almacenaje denominados “Sitio 1” y “Sitio 2”. Cada muestra será analizada tanto *in situ* como en laboratorio con la determinación de los parámetros que requieren el uso de técnicas analíticas.

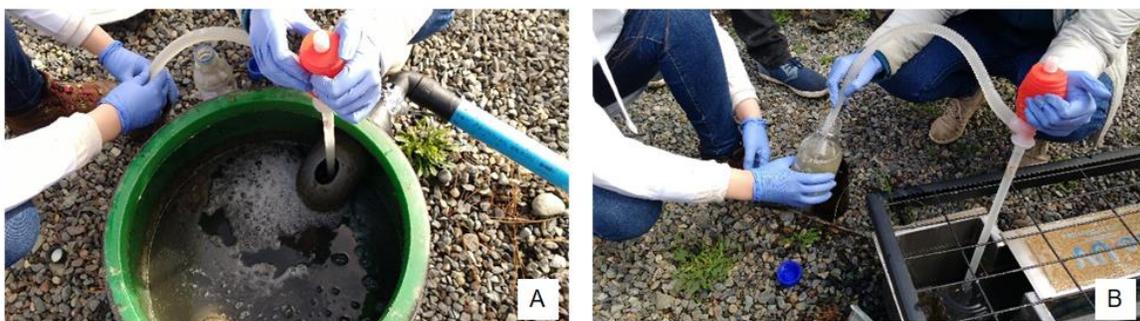


Figura 15. A). Extracción de muestras en sitio 1. Cámara de acumulación previa a reactor UV; B). Extracción de muestras en sitio 2. Cámara posterior del reactor UV.

Fuente: Imágenes propias.

Específicamente en esos dos lugares se realizará una caracterización tanto físico-química como también microbiológica para obtener los posteriores resultados.

4.5 Caracterización de muestras obtenidas

Se realizará una caracterización de variables físico-químicas que evalúan las concentraciones de Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Solidos Suspendidos Totales (SST), ion Amonio N-NH₄⁺, Turbidez, Color (254mm 440mm) y pH (APHA, 2005). De igual forma, la caracterización microbiológica consistirá en evaluar la presencia de organismo tomando en cuenta los parámetros: Coliformes totales (CT), Coliformes fecales (CF) y colifagos somáticos (CS) (APHA, 2005).

Todos los ensayos anteriores se desarrollarán en el Laboratorio de Ingeniería y Biotecnología Ambiental, Facultad de Ciencias ambientales y Centro EULA-Chile y con base en el “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 22nd Edition” (APHA, 2005) y “Norma Chilena Oficializadas, serie NCh 2313-Residuos Industriales Líquidos”

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Equipos Instalados en la Unidad de Desinfección UV

En la siguiente imagen se muestran los equipos que forman parte el sistema piloto de desinfección UV.

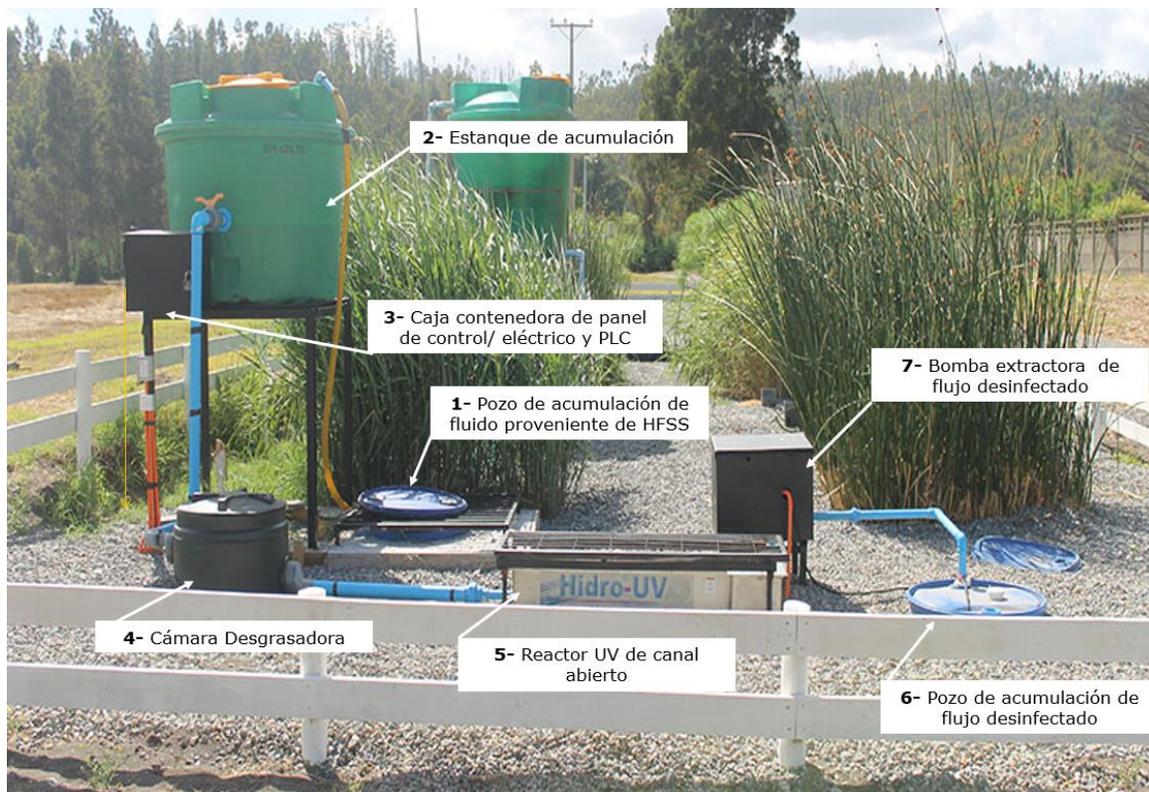


Figura 16. Fotografía del sistema piloto de desinfección UV una vez instalado (enero 2018).

Fuente: Imágenes propias.

5.2 Caracterización del influente al reactor UV y el efluente posterior a ese proceso

Se realizó un primer muestreo en el sistema piloto UV el día 6 de septiembre de 2018. Midiendo los parámetros *in situ* y tomando las muestras necesarias para realizar los ensayos en laboratorio posteriormente.

5.2.1 Caracterización Físicoquímica del influente y efluente

El resumen de la caracterización físico-química de los Sitios 1 y 2, correspondientes a la entrada y salida del reactor UV. Lo anterior se presenta en la Tabla 8.

Tabla 8. Resumen de la caracterización fisicoquímica en previa y posterior al reactor UV.

Parámetros	Unidad	Rango		Porcentaje de Eliminación (%)
		Sitio 1 (entrada)	Sitio 2 (salida)	
NH₄⁺	[mg/L]	54,33	25,58	-3,05
DBO₅	[mg O ₂ /L]	85,5	68,48	-19,91
DQO_T	[mg/L]	146,61	127,01	-13,37
DQO_s	[mg/L]	100,381	103,260	+2,89
SST	[g/L]	0,03075	0,02920	-5,05
Color (440 nm)	abs	0,152	0,155	-
Color (254 nm)	abs	0,655	0,656	-
Turbidez	NTU	96,3	90,9	-5,60
pH	-	7,44	7,68	-

Fuente: Elaboración propia

En referencia a la Tabla 8 muestra concentraciones de materia orgánica propias de un tratamiento por humedales construidos. Los parámetros de DBO₅ y DQO son normales según establece Vymazal (2008).

La turbidez registra una baja de 96,3 a 90,0 NTU, esto se explica debido a la gran acumulación de sedimentos en la cámara anterior al reactor UV y -en menor medida- a la acumulación de sedimentos por decantación dentro del mismo reactor.

Los rangos establecidos en la bibliografía nombrada anteriormente muestran valores entre los 12 y 67 NTU, dejando los valores obtenidos por sobre los de Quiñonez-Díaz et al. (2001).

Los SST en la bibliografía muestran valores en torno a los 35,1 mg/L. Lo que sería concordante con los valores obtenidos en esta primera muestra (30,75-29,2 mg/L). Finalmente, para el caso del NH_4^+ , los valores normales tienden a ser cercanos a 22,1 mg/L se encontraron valores de 1,805 y 1,750 mg/L. Valores considerablemente bajos, que pudo dependerse de algún error en la toma de muestras o en el ensayo con el método Fenol.

5.2.2 Caracterización Microbiológica preliminar del influente y efluente después de la instalación del sistema UV

La toma de muestras para la caracterización microbiológica se desarrolló el mismo día que para los parámetros fisicoquímicos. Se realizaron ensayos para Coliformes Totales y fecales, como también para Colifagos Somáticos.

Tabla 9. Resultados de parámetros microbiológicos y reducción logarítmica.

Parámetros	Unidad	Rango		Reducción (u Log)
		Influente	Efluente	
CT	[NMP/100 mL]	$5,4 \times 10^6$	$1,6 \times 10^4$	2,5
CF	[NMP/100 mL]	$1,7 \times 10^6$	$1,6 \times 10^4$	2,0
CS	[UFC/100 mL]	$2,3 \times 10^4$	$8,0 \times 10^2$	1,5

Fuente: Elaboración propia

Según lo establecido por la EPA (2006) y tomando en cuenta una dosis de 30 mJ/cm² de potencia germicida, la inactivación de microorganismos es media aún, dónde en función de esa dosis se esperarían valores de inactivación en torno a los 2-2,5 u Log.

Lo anterior es explicado por la gran presencia de sólidos suspendidos lo que implica condiciones no óptimas para el trabajo de la lámpara UV en el reactor.

Entre otras causas probables que pueden afectar a esta medición, están los efectos hidráulicos, el equipo reactor UV y el enfoque de monitoreo.

5.3 PROBLEMAS ASOCIADOS AL FUNCIONAMIENTO

Problemática 1: Formación de Biofilm y acumulación de sedimentos

En las siguientes imágenes, es posible apreciar una gran cantidad de elementos en el área previa al reactor y en el reactor propiamente tal. Se observan larvas de insectos, sedimento (Figuras 17 A, B y D) y la presencia de un Biofilm en el reactor UV (Figura 17 C).

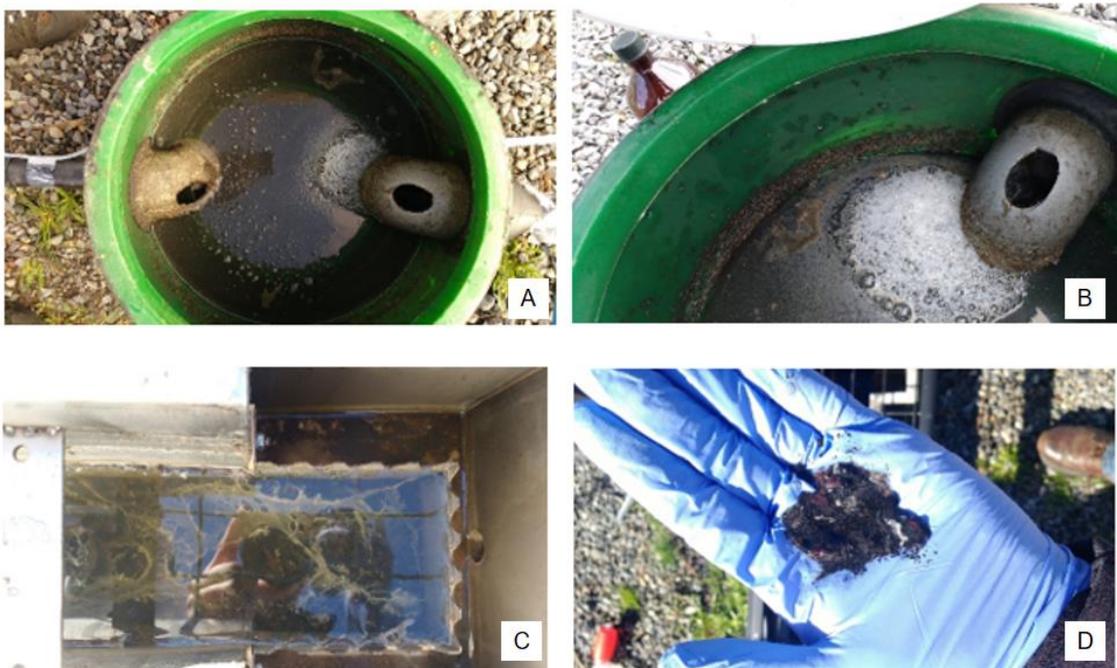


Figura 17. A) Aspecto de la cámara de decantación, visto desde arriba; B) Detalle de acumulación de partículas, sedimentos y larvas de insectos; C) Aspecto del decantador y el Biofilm generado; D) Detalle de material extraído que decantaba en el reactor.

Fuente: Imágenes propias.

La primera respuesta a lo sucedido en las imágenes es vinculada a la naturaleza del influente tratado, un influente proveniente de las aguas servidas de un área donde los sedimentos son variados. Eso sumado al transporte de sedimentos por el viento. Genera así la sinergia de esas dos fuentes con gran concentración de sólidos suspendidos y a la vez una incorrecta desinfección.

Problemática 2: Pérdida de vacío en el conducto de la bomba de extracción

El estanque de recepción posterior cuenta con una bomba de rodete periférico, la cual, por sus características, no es capaz de bombear continuamente el efluente ya desinfectado. Es necesario especificar qué tal bomba está calificada para utilizarla en aguas preferentemente limpias y de acuerdo a lo visto en terreno, el fluido posterior al reactor UV presenta una alta cantidad de partículas o sedimentos que originan este malfuncionamiento, lo que ocasiona la acumulación de burbujas de aire en el interior.

Lo anterior sucede debido a que las partículas, ocasionan problemas con la válvula de retención que no debe permitir el paso de burbujas de aire hacia el conducto. Un correcto proceso sería que el conducto previo a la bomba estuviera lleno de agua que luego se comprimirá, ocasionando el vacío.



Figura 18. A) Estanque de recepción y conducto de aspiración operando en buenas condiciones. B) Rebalse de fluido en estanque de recepción.

Fuente: Imágenes propias.

El procedimiento a seguir para resolver momentáneamente esta problemática es realizar el “cebado” de la bomba (Figura 19A) que consiste en llenar de líquido la tubería de aspiración succión y la carcasa de la bomba para facilitar la succión de líquido. Al mismo tiempo se debe extraer el mecanismo que acciona el sistema, es decir se extrae el flotador y el contrapeso desde la cámara receptora (Figura 19B)

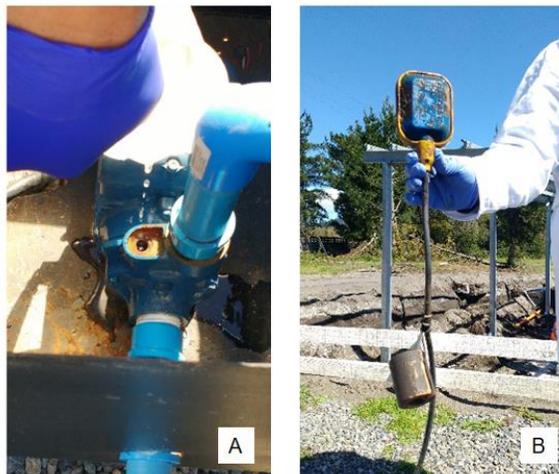


Figura 19. A) Cebado de la bomba B) Flotador de nivel y contrapeso extraídos del tanque de recepción.

Fuente: Imágenes propias.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De acuerdo a los datos obtenidos en este trabajo de investigación se pudieron obtener las siguientes conclusiones:

- El sistema de desinfección UV acoplado a los sistemas de HFSS se instalaron de forma adecuada para el funcionamiento en la planta piloto ubicada en Hualqui. El caudal utilizado en el sistema de desinfección fue optimizado para cumplir con los tiempos de residencia necesario de las aguas servidas a tratar.
- Los parámetros fisicoquímicos obtenidos a la salida del sistema de desinfección presentan concentraciones de DBO_5 , NH_4^+ y SST de 68.48 mg/L, 25,58 mg/L y 0.03 g/L, respectivamente. De acuerdo a la normativa vigente DS. 90 (Tabla 1) para cuerpos fluviales, estos efluentes cumplen con los límites determinados exceptuando para la concentración de DBO_5 .
- Las eficiencias de desinfección asociadas a CT, CF y CS presentaron reducción de 2.5 u Log, 2.0 u Log y 1.5 UFC, respectivamente. Estas eficiencias fueron menores a las reportadas en bibliografía y las normativas vigentes en Chile. Debido a lo anterior, se propone optimizar los caudales y las eficiencias de eliminación asociadas a SST, turbidez y color.

Sobre las recomendaciones es necesario precisar lo siguiente

1. La acumulación de sedimentos y la generación de Biofilm y en el reactor UV son dos situaciones que se relacionan, la primera implicando una incorrecta desinfección lo que daría el medio propicio para el crecimiento de las biopelículas para los microorganismos. Así, es necesario, realizar un pre-tratamiento previo al reactor UV. Podría utilizarse un tipo de tratamiento primario, constituido de una rejilla que no permita el paso de partículas de gran tamaño y también un sistema de decantación con recirculación.

2. Es necesario estudiar la viabilidad económica para la adquisición de una bomba de características sumergible, con una potencia de 3/4 Hp y un caudal de operación que cumpla con los 50 l/min. Esta bomba iría en reemplazo de la unidad periférica y estaría calificada como una solución definitiva para la no ocurrencia de rebalses en el circuito final del sistema.

3. Debido a que no hay mucha información sobre programas de cumplimiento, frente a la limpieza del reactor y las cubiertas de cuarzo. Es necesario realizar un calendario de limpiezas y su periodicidad dada por el tiempo de operación del sistema de desinfección.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Public Health Association (APHA), American water works association (AWWA), pollution control federation (WPCF), 2005. Standard methods for examination of water and wastewater. 21th ed. Washington.
- Acevedo L. (2015). Evaluación de procesos de desinfección (Cloro y UV) en sistemas de tratamiento de aguas servidas descentralizados (Humedales construidos). Tesis Ingeniería Ambiental, Facultad de Ciencias Ambientales, Universidad de Concepción. 89p.
- Azaizeh H., Linden, K., Barstow C., Kalbouneh, S., Tellawi A., Albalawneh A., & Gerchman Y. (2012). Constructed wetlands combined with UV disinfection systems for removal of enteric pathogens and wastewater contaminants. *Water Science and Technology* 67(3), 651.
- Richter, A. & Weaver, R. (2008). Ultraviolet disinfection of effluent from subsurface flow constructed wetlands. *Environmental Technology* 24, 8.
- Bitton G. (2014). Microbiology of Drinking Water Production and Distribution. *John Wiley & Sons Inc.*, 289.
- Bull R. (1982). Health effects of drinking Water Disinfectants and Disinfectant ByProducts. *Environmental Science and Technology* 16, 554–559.
- Chan Ly J. (2018). Ultraviolet disinfection system for constructed wetlands. Master of Science. *Humboldt state university* 57.
- Chen W., Lu S., Jiao W., Wang M. & Chang A. (2013). Reclaimed water: A safe irrigation water resource. *Environment and Development*, 8, 74-83.
- Collivignarelli M., Abba A., Benigna I., Sorlini S., & Torretta, V. (2017). Overview of the Main Disinfection Processes for Wastewater and Drinking Water Treatment Plants. *Sustainability* 10(2), 86.
- Cuenca M. (2015). Selección de un sistema de desinfección en proyectos de reutilización de las aguas residuales tratadas. (Tesis Doctoral) Universidad Politécnica de Valencia. 58-88.

- Demográficas y Vitales. País y regiones por áreas urbana-rural: actualización población 2002-2012 y proyecciones. (2015). INE. 2013-2020.
- Díaz M. & Serrano L. (2002). Desinfección de agua con luz ultravioleta. *Agua Latinoamérica*.
- Carré E., Pérot J., Jauzein V. & Lopez-Ferber M. (2018). Impact of suspended particles on UV disinfection of activated-sludge effluent with the aim of reclamation. *Journal of Water Process Engineering*. 22, 87-93.
- Diagnóstico del potencial reúso de aguas residuales en la Región de Valparaíso. (2016). Fundación Chile. Chile.
- Hijnen W., Beerendonk E., Medema G. (2006). Inactivation credit of UV radiation for viruses, bacteria and protozoan cysts in water: A review. *Water Research* 40(1), 3-22.
- Hua G. & Yeats S. (2010). Control of Trihalomethanes in Wastewater Treatment. Florida. *Water Resources Journal* 1, 6-11
- Lazarova V., Levine B., Sack J., Cirelli G., Jeffrey P., Muntau H., Salgot M. & Brissaud F. (2001). Role of water reuse for enhancing integrated water management in Europe and Mediterranean countries. *Water Science and Technology* 43(10), 25-33.
- Malato S., Fernandez-Ibañez P., Maldonado M., Blanco J. & Gernjal W. (2009). Descontamination and disinfection of water by solar photocatalysis: recent overview and trends. *Catalysis Today* 147,1–59.
- Metcalf & Eddy. (2003). Treatment and Reuse. *Wastewater Engineering*. Editorial *McGraw-Hill*. 1819
- Metcalf & Eddy. (2007). Water Reuse: Issues, Technologies, and Applications. Editorial *McGraw-Hill*. 674-718
- Norma Chilena Oficial NCh 409/05.Of. 84. Agua potable - Parte 1 – Requisitos. (1984). Instituto Nacional de Normalización. Norma Chilena Oficial NCh 1333/87.Of. 78. Requisitos de calidad de agua para diferentes usos. (1978). Instituto Nacional de Normalización.

- División de desarrollo regional. Unidad de saneamiento sanitario. (2012). Resumen catastro plantas de tratamiento de aguas servidas sector rural año. Ministerio del interior y seguridad pública subsecretaría de desarrollo regional y administrativo. 1-77.
- National Water Research Institute (NWRI). (2012). Ultraviolet Disinfection Guidelines for Drinking Water and Water Reuse, 3rd Edition. *National Water Research Institute*. Fountain Valley, CA,
- Organización Mundial de la salud (OMS). (2008). Guías para la calidad del agua potable. (3a ed.). Ginebra: OMS.
- Pereira, L.S., Oweis, T. and Zairi, A. (2002) Irrigation management under water scarcity. *Agricultural Water Management* 57(3), 175-206.
- Pizarro L. (2011) Diagnóstico y desafíos para los sistemas de tratamiento de aguas servidas en localidades rurales. (Tesis). Universidad de Chile. 150-158, 181-196.
- Ramalho R. (1983). Tratamiento de aguas residuales. *Editorial Reverté*. 705.
- Rodríguez P. (2011). Análisis de la Situación de las Aguas Servidas en Zonas Rurales de la IV, VI y RM de Chile y Proposición de un Sistema Sustentable para su Tratamiento. 19-20.35.
- Rojas, K. Vera, I. & Vidal, G. (2013). Influence of season and species *Phragmites australis* and *Schoenoplectus californicus* on the removal of organic matter and nutrients contained in sewage wastewater during the startup operation of the horizontal subsurface flow constructed wetland. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia* 69(12), 230-240.
- Segura D., Carrillo V., Remonsellez F., Araya M. & Vidal, G. (2018). Comparison of public attitudes in desert and rainy regions of Chile about the reuse of treated sewage water. *Water* 10 (334): 1-24.
- Sepúlveda-Mardones, M., López, D. & Vidal, G. (2017). Methanogenic activity in the biomass from horizontal subsurface flow constructed wetlands treating domestic wastewater. *Ecological Engineering* 105, 66–77.

- Superintendencia de Servicios Sanitarios-SISS (2010). Santiago, Chile. Visión preliminar del efector del terremoto en los Servicios Sanitarios. Recuperado de http://www.siss.gob.cl/586/articles-8189_recurso_1.pdf
- Suárez J. & Jácome A. (2012). Tema- Desinfección UV. Curso “Tratamientos avanzados del agua”. Master en ingeniería del agua Universidad de la Coruña. Recuperado de ftp://ceres.udc.es/master_en_ingenieria_del_agua/master%20antiguo_antes%20del%202012/Segundo_Curso/Tratamientos_Avanzados_del_Agua/Master___TEMA_desinfeccionUV_010409.pdf
- U.S. Environmental Protection Agency. (2006). Ultraviolet disinfection guidance manual for the final long term 2 enhanced surface water treatment rule. Office of Water. EPA 815-R-06-007
- Vargas C. (1998). Failures and problems of rural disinfection. In *Regional Symposium on Water Quality: Effective Disinfection* CEPIS. 113.
- Vázquez-López, M., Amabilis-Sosa, L.E. Moeller-Chávez, G.E., Roé-Sosa, A. Neumann, P. & Vidal G. (2018). Evaluation of the ultrasound effect on treated municipal wastewater. *Environmental Technology* DOI: 10.1080/09593330.2018.1481889.
- Véliz R. (2018). Desinfección del efluente secundario de la planta de agua residual de Ayacucho con radiación Ultravioleta para su reutilización en riego agrícola. *Revista Sociedad Química del Perú*. 84, 41-56.
- Vidal G. & Araya F. (2014). Las aguas servidas y su depuración en zonas rurales: situación actual y desafíos. Ediciones Universidad de Concepción, ISBN 978-956-227-378-7, Registro de Propiedad Intelectual 242.970 año 2014, 118 pp.
- Vidal G. & Hormazabal S. (2018). Humedales Construidos: diseño y operación”. 2018. Ediciones Universidad de Concepción, ISBN 978-956-227-419-7 y Registro de Propiedad Intelectual 290632, año 2018, 253 pp.

- Wang F. Wang Y. & Ji M. (2005) Mechanisms and kinetic models for ultrasonic waste activated sludge disintegration. *Journal Hazardous Materials* B123, 145–150.