



Universidad de Valladolid

**Escuela de Ingeniería de la industria Forestal,
Agronómica y de la Bioenergía**

Campus de Soria

MÁSTER EN INGENIERÍA DE LA BIOENERGÍA Y SOSTENIBILIDAD ENERGÉTICA

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**TITULO: REDUCCIÓN DE PATÓGENOS EN AGUA DE CONSUMO Y
REUTILIZADAS MEDIANTE APLICACIÓN DE LUZ ULTRAVIOLETA
DE BAJO CONSUMO**

~~~~~

**AUTOR: CÉSAR RUIZ PALOMAR.**

**DEPARTAMENTO: INGENIERÍA QUÍMICA Y TECNOLOGÍA DEL  
MEDIO AMBIENTE, CIENCIAS AGROFORESTALES Y FÍSICA APLICADA.**

**TUTOR/ES: D. IGNACIO DE GODOS CRESPO, ANTONIO M<sup>a</sup> GASCÓ  
GUERRERO y VÍCTOR ALONSO GÓMEZ.**

**SORIA, 24 DE JUNIO DE 2019**

***AUTORIZACIÓN del TUTOR  
del TRABAJO FIN DE MASTER***

D. Ignacio de Godos Crespo, profesor del Departamento de Ingeniería Química y Tecnología del Medio Ambiente; D. Antonio María Gascó Guerrero, como profesor del Departamento de Ciencias Agroforestales y D. Víctor Alonso Gómez, como profesor del Departamento de Física Aplicada, como Tutores del TFM titulado: REDUCCIÓN DE PATÓGENOS EN AGUA DE CONSUMO Y REUTILIZADAS MEDIANTE APLICACIÓN DE LUZ ULTRAVIOLETA DE BAJO CONSUMO, presentado por el alumno D. **César Ruiz Palomar**, dan el Vº. Bº. y autorizan la presentación del mismo, considerando que procede su defensa.

Soria, 24 de Junio de 2019

Los Tutores del TFG,

Fdo.: Ignacio de Godos Crespo

Fdo.: Antonio María Gascó Guerrero

Fdo.: Víctor Alonso Gómez

## ***DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD***

D. César Ruiz Palomar, estudiante del Máster en Ingeniería de la Bioenergía y Sostenibilidad Energética de la Escuela de Ingeniería de la Industria Forestal, Agronómica y de la Bioenergía de la Universidad de Valladolid, **DECLARO:**

Que el trabajo fin de máster que presento para su exposición y defensa titulado Reducción de patógenos en agua de consumo y reutilizadas mediante aplicación de luz ultravioleta de bajo consumo.

**Es original y que todas las fuentes utilizadas para su realización han sido debidamente citadas en el mismo.**

Soria, 24 de Junio de 2019

Fdo.: César Ruiz Palomar

## TRABAJO FIN DE MASTER

“Reducción de patógenos en agua de consumo y reutilizadas mediante aplicación de luz ultravioleta de bajo consumo”.

### RESUMEN

En este trabajo fin de master se analiza la capacidad de eliminación de bacterias patógenas aplicando luz ultravioleta mediante lámparas de tecnología UV-LED, y su comparación con las lámparas UV convencionales de vapor de mercurio, siendo estas últimas menos eficientes y más contaminantes. La capacidad para eliminar bacterias va a depender de la longitud de onda del espectro y la intensidad de ésta. La investigación se ha centrado en el estudio del empleo de diferentes tecnologías de aplicación de luz ultravioleta, lámpara UV convencional y UV-LED, empleando idénticas longitudes de onda en ambas tecnologías. Complementariamente, se estudió la mejora del rendimiento germicida usando longitudes de onda más elevadas, cercanas a la luz visible, combinadas con la aplicación de catalizadores en el agua. En todos los ensayos, para conocer el rendimiento de eliminación de patógenos se empleó el método de recuento de unidades formadoras de colonias (UFC). Tras la aplicación de diferentes dosis de irradiación al agua, las bacterias que logran sobrevivir, viables, se reproducen en medio de cultivo a una temperatura constante de  $37 \pm 1^\circ\text{C}$ . Para comprobar la viabilidad de aplicación del método de desinfección para uso de aguas recuperadas en riegos, se evaluó el principal indicador de contaminación indicado por la normativa vigente: la presencia de coliformes, concretamente la presencia de la bacteria coliforme *Escherichia coli*. En condiciones óptimas de irradiación con luz LED, los valores obtenidos tras la irradiación con la lámpara UV-LED 365 nm se encontraron dentro de los límites permitidos por la legislación para riegos de cultivos.

**Palabras clave:** Diodo emisor de luz ultravioleta (UV-LED), Desinfección, Tratamiento de aguas, Coliformes, *E. coli*.

### ABSTRACT

In this project, we analyse the ability to eliminate pathogenic bacteria by applying ultraviolet light using UV-LED technology, and its comparison with conventional mercury vapour UV lamps; the latter being less efficient and more polluting. The ability to eliminate bacteria will depend on the wavelength of the spectrum and its intensity. The research has been focused on the study of the use of different technologies of application of ultraviolet light, namely conventional UV lamp and UV-LED, using identical wavelengths in both technologies. In addition, the improvement of germicidal performance was studied using higher wavelengths, close to visible light, combined with the application of catalysts in water. In all the tests, to know the performance of elimination of pathogens, counting colony-forming units (CFU) was used. After the application of different doses of irradiation to water, viable bacteria would survive in a culture medium at a constant temperature of  $37 \pm 1^\circ\text{C}$ . To verify the feasibility of applying the disinfection method for the use of recovered water in irrigation, the main indicator of contamination indicated by the current regulations was evaluated: the presence of coliforms, specifically the presence of the coliform bacteria *Escherichia coli*. Under optimum irradiation conditions with UV-LED light, the values obtained after irradiation with the lamp at 365 nm were within the limits allowed by the legislation for crop irrigations.

**Keywords:** Ultraviolet light emitting diode (UV-LED), Disinfection, Water treatment, Coliforms, *E. coli*.

INDICE

|                                                                                      | Página     |
|--------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>1. INTRODUCCIÓN</b>                                                               | <b>3</b>   |
| 1.1. Justificación y objetivo del trabajo                                            | 3          |
| 1.2. Estado del arte de la depuración de aguas residuales mediante luz ultravioleta  | 4          |
| 1.3. Marco normativo                                                                 | 5          |
| <b>2. OBJETIVO</b>                                                                   | <b>8</b>   |
| <b>3. MATERIAL Y MÉTODOS</b>                                                         | <b>8</b>   |
| 3.1. Luz ultravioleta                                                                | 8          |
| 3.1.2. Caracterización de la fuente ultravioleta                                     | 11         |
| 3.1.2.1. Lámpara ultravioleta convencional                                           | 14         |
| 3.1.2.2. Lámpara UV-LED                                                              | 15         |
| 3.2. Luz visible                                                                     | 16         |
| 3.2.1. Caracterización de la fuente de luz visible                                   | 16         |
| 3.3. Agua residual EDAR de Medinaceli                                                | 18         |
| 3.4. Medios de cultivo                                                               | 18         |
| 3.5. Catalizadores                                                                   | 19         |
| 3.6. Método de determinación del efecto germicida                                    | 20         |
| <b>4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>                                                     | <b>23</b>  |
| 4.1. Caracterización de la fuente de luz ultravioleta                                | 23         |
| 4.2. Caracterización de la fuente de luz visible                                     | 24         |
| 4.3. Eliminación de coliformes en agua residual                                      | 25         |
| 4.4. Cuantificación de la capacidad de inactivación de las lámparas UV               | 25         |
| 4.5. Análisis energético                                                             | 26         |
| <b>5. CONCLUSIONES</b>                                                               | <b>29</b>  |
| <b>6. BIBLIOGRAFÍA</b>                                                               | <b>30</b>  |
| <b>ACRÓNIMIO</b>                                                                     | <b>32</b>  |
| <b>ANEXOS</b>                                                                        | <b>33</b>  |
| <b>ANEXO I. PREPARACIÓN DE FERROXALATO DE POTASIO</b>                                | <b>33</b>  |
| <b>ANEXO II. PREPARACIÓN DEL ACTINÓMETRO</b>                                         | <b>33</b>  |
| <b>ANEXO III. CARACTERIZACIÓN DE LA FUENTE DE LUZ ULTRAVIOLETA</b>                   | <b>34</b>  |
| <b>ANEXO IV. MEDIOS DE CULTIVO PARA COLIFORMES</b>                                   | <b>58</b>  |
| <b>ANEXO V. ANÁLISIS EN LABORATORIO DE AGUA RESIDUAL DE LA EDAR DE MEDINACELI</b>    | <b>65</b>  |
| <b>ANEXO VI. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE DESINFECCIÓN</b>                           | <b>68</b>  |
| <b>ANEXO VII. CAPACIDAD DE INACTIVACIÓN PARA <i>E. COLI</i> Y COLIFORMES TOTALES</b> | <b>100</b> |
| <b>INDICE FIGURAS</b>                                                                | <b>106</b> |
| <b>INDICE TABLAS</b>                                                                 | <b>112</b> |

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Justificación y objetivo del trabajo.

El crecimiento de la población y las necesidades de los ciudadanos de explotar los recursos naturales está produciendo un estrés en los recursos del planeta. Los recursos hídricos naturales no son suficientes en muchos lugares del mundo para satisfacer la creciente demanda de agua por parte de la población. La escasez de pluviometría durante los ciclos climáticos es evidente debido al cambio climático, lo que produce un aumento de la sequía en todo el mundo [1].

En 2050, la población del planeta se incrementará hasta 9000 millones de personas, las cuales necesitarán explotar los recursos del planeta para poder sobrevivir. También se producirán fuertes periodos de inundación y sequías debido al cambio climático. Un gran reto para la sociedad será satisfacer la gran demanda de suministro de agua en el futuro.

El sol es el encargado de evaporar el agua superficial del planeta hacia la atmósfera. Las moléculas de agua en estado gaseoso se unen a las partículas de polvo en suspensión, el agua se condensa y precipita de nuevo a la superficie terrestre en forma de lluvia, nieve o granizo. La cantidad de agua en el planeta es por consiguiente constante. El problema está en que se está usando en cantidades mayores, haciendo que el agua escasee y exista una mayor diferencia entre las zonas de mayor y menor disponibilidad [2].

La cantidad de lluvia que cae en el planeta es de aproximadamente 42.700 billones de m<sup>3</sup>. Solamente de 9.000 a 14.000 billones de m<sup>3</sup> de agua de lluvia al año se encuentran disponibles como recurso de agua dulce; el resto se dirige hacia el mar antes de su posible aprovechamiento [3]. En muchas regiones altamente pobladas el 90% del agua de lluvia anual cae en un periodo de 3-4 meses. Por lo tanto el aprovechamiento del agua es muy reducido [4].

Inevitablemente se está incrementando la generación de residuos y vertidos contaminantes, los cuales degradan la calidad de los acuíferos más cercanos. Por lo tanto, la depuración de aguas residuales es clave para la reducción del impacto ambiental y el correcto desarrollo del planeta [5].

Mediante el uso de aguas reutilizadas se consigue satisfacer la demanda hídrica de industrias como la agroforestal, la cual requiere una gran necesidad de agua, para riego fundamentalmente. Según el instituto Nacional de estadística en el año 2016 se empleó 14.948 hm<sup>3</sup> de agua para la técnica de riego. La superficie total española utilizada para cultivos de regadío en 2018 fue de 1.921.945 ha [29].

Aunque preferentemente se usan aguas no regeneradas para el riego, es decir aguas extraídas directamente de las cuencas hidrográficas, en las regiones con mayor déficit hídrico desde hace años se vienen usando aguas reutilizadas. La regeneración convencional consiste en una serie de tratamientos fisicoquímicos destinados a la eliminación de contaminación de origen químico y biológico. Entre los sistemas de eliminación de contaminación biológica destaca el empleo de luz ultravioleta germicida emitida desde lámparas de vapor de mercurio.

## REDUCCIÓN DE PATÓGENOS EN AGUA DE CONSUMO Y REUTILIZADAS MEDIANTE APLICACIÓN DE LUZ ULTRAVIOLETA DE BAJO CONSUMO

En este trabajo, se pretende demostrar que el uso de la tecnología de emisión de luz ultravioleta basada en diodos (UV-LED) es una posible alternativa a las lámparas de mercurio convencionales, utilizadas comúnmente para desinfección. Esta alternativa posee numerosas ventajas, tales como, mayor respeto con el medio ambiente a la hora de su fabricación (no posee mercurio), son más versátiles a la hora de utilizar diferentes longitudes de onda, son más resistentes, poseen mayor fiabilidad y menor degradación. Por lo tanto, son más duraderas. Además son más compactas, comienzan a funcionar en menor tiempo, su consumo energético es menor, ya que tienen menores pérdidas de energía en forma de calor, y presentan una mayor resistencia a los ciclos de encendido y apagado.

Los UV-LED se caracterizan por la posibilidad de emitir a diferentes longitudes de onda, sin embargo la lámpara ultravioleta convencional emite a un espectro continuo y amplio de longitudes de onda germicidas. Por lo tanto, es conveniente realizar un estudio específico con diferentes longitudes de onda para comprobar su eficiencia en cada zona del espectro [6].

### **1.2. Estado del arte de la depuración de aguas residuales mediante luz ultravioleta.**

Para la desinfección de aguas residuales, la longitud de onda más letal para los microorganismos es la que se encuentra en la banda UV-C del espectro luminoso. Para la mayoría de los microorganismos, las longitudes de onda próximas a 260 nm son las que poseen un mayor poder germicida, disminuyendo su eficacia por debajo de 230 o por encima de 300 nm [7].

La luz UV-C es altamente eficaz para eliminar e impedir el ataque de contaminantes biológicos. La exposición a los rayos UV-C produce la inactivación de los microorganismos. Estos causan daños en el ADN de los microorganismos produciendo dímeros de ciclobutano pirimidina (CPD); de esta forma se interfiere en la replicación del ADN y, por lo tanto, se ve alterada la estructura del ADN y el microorganismo muere [7].

Gracias a los diodos emisores de luz (LED) construidos con nitruro de galio (GaN) se consigue llegar a una iluminación de estado sólido blanca de alta eficiencia. Los (LED) blancos de GaN poseen una eficiencia luminosa superior a 150 lm/W. Respecto a su eficiencia cuántica, ésta es superior al 60%; lo que junto con la mejora en la calidad de los materiales y la reducción de sus costes ha facilitado que la adopción de los LED para iluminación sea competitiva con las tecnologías de iluminación tradicionales [8]. Es importante señalar la baja eficiencia cuántica externa (EQE) para los dispositivos UV-LED de menor longitud de onda. Ésta es inferior al 10% cuando se emplean LEDs con una longitud de onda de emisión por debajo de los 300 nm [9].

En general existe una dificultad en la comparativa de estudios de desinfección con luz ultravioleta ya que en la mayoría de los estudios de desinfección desarrollados usando luz ultravioleta, las dosis utilizadas son muy variables y los métodos de medición no han sido normalizados. De todas maneras pueden compararse los diferentes estudios en función de la dosis de luz ultravioleta definida como la cantidad de energía que se aplica por superficie. [10].

La cantidad de energía por superficie estimada en la planta de reutilización de aguas residuales más grande del mundo es de 800 a 900 mJ/cm<sup>2</sup> [1].

La fotocatalisis ha surgido recientemente como una solución ecológica para la mejora de la eficiencia de desinfección de microorganismos. Es una tecnología explotada en todo el mundo para alcanzar los objetivos ambientales planteados en una sociedad moderna. Esta alternativa ecológica se basa en el uso de la luz para causar una degradación potencial o incluso la completa desmineralización de diferentes compuestos [25].

Para evaluar la eficiencia de la desinfección, se emplea el método de recuento de UFC (unidades formadoras de colonias) de microorganismos coliformes como indicadores del número de bacterias que posee el agua contaminada [10].

Es importante conocer la eficiencia de desinfección a la hora de emplear esta tecnología de bajo coste y compatible con el uso sostenible del medio ambiente, ya que el conseguir buenos resultados de desinfección en el menor tiempo posible permite ahorrar mayor cantidad de energía y, por consiguiente, un mayor ahorro económico.

Por lo tanto, este trabajo tiene como objetivo conocer la mayor eficiencia de desinfección, empleando distintas longitudes de onda y aplicando foto-catalizadores, para mejorar la eficiencia de desinfección y así poder conocer el potencial real de inactivación de los microorganismos presentes en el agua contaminada.

### **1.3. Marco normativo**

A nivel europeo, la política de la Comunidad Europea en el ámbito del medio ambiente contribuye a alcanzar la conservación, la protección y la mejora de la calidad medioambiental, y la protección de la salud de las personas; así como el uso prudente y racional de los recursos hídricos, y medidas para hacer frente a los problemas, tanto a nivel regional como mundial, del medio ambiente. Las leyes se basan en el principio de quien contamina, paga. (Artículo 130R, del Tratado de la Unión Europea). La reutilización de aguas queda recomendada como método para disminuir la presión sobre las cuencas hidrográficas (Directiva 2000/60/EC).

En España tiene asimismo específicamente vigor el Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas.

Se pretende adecuar las condiciones de las aguas reutilizadas a las exigencias de calidad vigentes en cada momento, contemplando las especificaciones técnicas, y así evitando las condiciones que podrían suponer un riesgo para la salud de los ciudadanos.

En las siguientes tablas se recogen los criterios de calidad para la utilización de las aguas regeneradas según los usos establecidos. Estos criterios tendrán la consideración de mínimos obligatorios exigibles para los usos indicados, cumpliendo con los criterios de calidad establecidos a continuación:

REDUCCIÓN DE PATÓGENOS EN AGUA DE CONSUMO Y REUTILIZADAS MEDIANTE APLICACIÓN DE LUZ ULTRAVIOLETA DE BAJO CONSUMO

| Uso del agua previsto                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Valor máximo admisible <i>E.coli</i> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| <b>Calidad 1.1 Residencial</b><br>a) Riego de jardines privados<br>b) descarga de aparatos sanitarios                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 0 UFC/100ml                          |
| <b>Calidad 1.2: Servicios</b><br>a) Riego de zonas verdes urbanas (parques campos deportivos y similares).<br>b) Baldeo de calles<br>c) Sistemas contra incendios<br>d) lavado industrial de vehículos                                                                                                                                                                                                                | 200 UFC/100ml                        |
| <b>2. Usos agrícolas</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                      |
| <b>Calidad 2.1</b><br>a) Riego de cultivos con sistema de aplicación del agua que permita el contacto directo del agua regenerada con las partes comestibles para alimentación humana en fresco.                                                                                                                                                                                                                      | 100 UFC/100ml                        |
| <b>Calidad 2.2</b><br>a) Riego de productos para consumo humano con sistema de aplicación de agua que no evita el contacto directo del agua regenerada con las partes comestibles, pero el consumo no es en fresco sino con un tratamiento industrial posterior.<br>b) Riego de pastos para consumo de animales productores de leche o carne.<br>c) Acuicultura.                                                      | 1.000 UFC/100ml                      |
| <b>Calidad 2.3</b><br>a) Riego localizado de cultivos leñosos que impida el contacto del agua regenerada con los frutos consumidos en la alimentación humana.<br>b) Riego de cultivos de flores ornamentales, viveros invernaderos sin contacto directo del agua regenerada con las producciones.<br>c) Riego de cultivos industriales no alimentarios, viveros, forrajes ensilados, cereales y semillas oleaginosas. | 10.000 UFC/100ml                     |
| <b>3. Usos industriales</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                      |
| <b>Calidad 3.1</b><br>a) Aguas de proceso y limpieza excepto en la industria alimentaria.<br>b) Otros usos industriales.                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 10.000 UFC/100ml                     |
| c) Aguas de proceso y limpieza para uso en la industria alimentaria.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 1.000 UFC/100ml                      |
| <b>Calidad 3.2</b><br>a) Torres de refrigeración y condensadores evaporativos.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Ausencia UFC/100ml                   |
| <b>4. Usos recreativos</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                      |
| <b>Calidad 4.1</b><br>a) Riego de campos de golf                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 200 UFC/100ml                        |
| <b>Calidad 4.2</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                      |

REDUCCIÓN DE PATÓGENOS EN AGUA DE CONSUMO Y REUTILIZADAS MEDIANTE APLICACIÓN DE LUZ ULTRAVIOLETA DE BAJO CONSUMO

|                                                                                                                      |                                                        |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| a) Estanques, masas de agua y caudales ornamentales impedido el acceso del público al agua.                          | 10.000 UFC/100ml                                       |
| <b>5. Usos ambientales</b>                                                                                           |                                                        |
| <b>Calidad 5.1</b><br>Recarga de acuíferos por percolación localizada a través del terreno.                          | 1.000 UFC/100ml                                        |
| <b>Calidad 5.2</b><br>a) Recarga de acuíferos por inyección directa.                                                 | 0 UFC/100ml                                            |
| <b>Calidad 5.3</b><br>a) Riego de bosques, zonas verdes y de otro tipo no accesibles al público.<br>b) Silvicultura. | No se fija límite                                      |
| <b>Calidad 5.4</b><br>a) Otros usos ambientales (mantenimiento de humedales, caudales mínimos y similares).          | La calidad mínima requerida se estudiará caso por caso |

Tabla 1. Normativa uso de aguas.

No estará permitida la reutilización de aguas para los siguientes usos:

1. Para consumo humano, salvo situaciones de declaración de catástrofe en las que la autoridad sanitaria especificará los niveles de calidad exigidos a dichas aguas y los usos.
2. Para los usos propios de la industria alimentaria, tal y como se determina en el artículo 2.1 b) del Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano, salvo lo dispuesto en el anexo I.A.3.calidad 3.1c) para el uso de aguas de proceso y limpieza en la industria alimentaria.
3. Para uso en instalaciones hospitalarias y otros usos similares.
4. Para el cultivo de moluscos filtradores en acuicultura.
5. Para el uso recreativo como agua de baño.
6. Para el uso en torres de refrigeración y condensadores evaporativos, excepto lo previsto para uso industrial en el anexo I.A.3.calidad 3.2.
7. Para el uso en fuentes y láminas ornamentales en espacios públicos o interiores de edificios públicos.
8. Para cualquier otro uso que la autoridad sanitaria o ambiental considere un riesgo para la salud de las personas o un perjuicio para el medio ambiente, cualquiera que sea el momento en el que se aprecie dicho riesgo o perjuicio.

## 2. OBJETIVO

Esta investigación centra su objetivo en el estudio del potencial de las lámparas UV-LED para la eliminación de bacterias patógenas en aguas residuales. Estas bacterias patógenas son indicadoras de contaminación biológica del agua, las cuales se pretenden eliminar mediante la aplicación de luz UV. Para la realización de las pruebas de desinfección se han utilizado tanto lámparas UV-LED diseñadas en la Escuela de Ingeniería de la industria Forestal, Agronómica y de la Bioenergía (EIFAB), como lámparas comerciales convencionales basadas en tubos fluorescentes. Así se compara la tecnología que se quiere implementar con la comercializada actualmente, centrándose el objetivo en el efecto que generan las dos principales variables que determinan el rendimiento de desinfección: longitud de onda del espectro luminoso y potencia que proporciona la lámpara. Los objetivos específicos marcados en esta investigación son los siguientes:

1. Estudio de la relación de la muerte de los patógenos, *E. coli* y coliformes totales, con respecto a la energía luminosa suministrada y la longitud de onda de la luz.
2. Comparación de la eficiencia de desinfección entre la lámpara UV convencional y la lámpara UV-LED.
3. Evaluar la mejora de eficiencia al aplicar foto-catalizadores en el agua durante la prueba de desinfección.

## 3. MATERIAL Y MÉTODOS

### 3.1. Luz ultravioleta

Utilizamos para realizar los ensayos de desinfección de aguas residuales dos tipos de tecnologías de fuente de luz ultravioleta. A modo de comparativa, se comprueba la eficiencia de desinfección entre una lámpara UV convencional de vapor de mercurio, y una lámpara UV-LED (Figuras 1 y 2).



Figura 1. Lámpara UV de vapor de mercurio (detalle).



Figura 2. Lámpara UV-LED (detalle).

## REDUCCIÓN DE PATÓGENOS EN AGUA DE CONSUMO Y REUTILIZADAS MEDIANTE APLICACIÓN DE LUZ ULTRAVIOLETA DE BAJO CONSUMO

Los diodos emisores de luz ultravioleta (UV LED) comenzaron a aparecer en 2003. Estos UV LED son de gran interés debido a su diverso rango de aplicaciones [8]. La utilización de la luz ultravioleta abarca diferentes campos. Modificando su método de aplicación, longitud de onda, intensidad, tiempo de exposición y la intensidad se puede emplear en campos tan variados como: estética, curado de materiales, inspecciones técnicas, y desinfección.

El rango del espectro de luz ultravioleta se encuentra en una longitud de onda entre 100 y 400 nm y, a su vez, se divide en tres bandas, según puede comprobarse en el espectro de la (figura 3): la luz UV-A, la cual se encuentra a una longitud de onda entre 315-400 nm; la luz UV-B, la cual se encuentra a una longitud de onda entre 280-315 nm; y la luz UV-C, la cual se encuentra a una longitud de onda entre 100-280 nm.

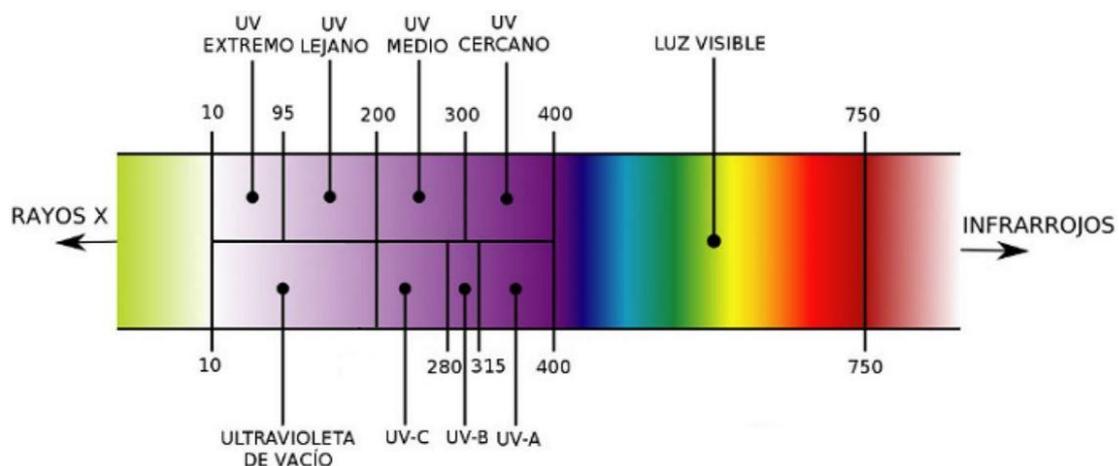


Figura 3. Longitudes de onda del espectro luminoso.

En la banda UV-C se encuentra en el rango de longitudes de onda más letales para los microorganismos. Para un amplio rango de microorganismos el pico de absorción del ADN bacteriano se encuentra en longitudes de onda próximas a 265 nm, disminuyendo su eficacia por debajo de 230 nm o por encima de 300nm. La luz UV-C es altamente eficaz para eliminar e impedir el ataque de contaminantes biológicos. La exposición a los rayos UV-C produce la inactivación de los microorganismos.

Entre otros efectos, la luz UV detiene el crecimiento de las células y causa su muerte. La radiación UV es absorbida por los nucleótidos, los cuales se ven alterados por cambios físicos de electrones, formándose uniones cruzadas entre tiamina y citosina, que son nucleótidos de bases pirimidínicas, los cuales pertenecen a la misma cadena; por lo tanto se produce una formación de dímeros ciclobutil pirimidina (CPD) y, de esta forma, se interfiere en la replicación del ADN (Figura 4). Por lo tanto, se ve alterada la estructura del ADN [7, 11].

## REDUCCIÓN DE PATÓGENOS EN AGUA DE CONSUMO Y REUTILIZADAS MEDIANTE APLICACIÓN DE LUZ ULTRAVIOLETA DE BAJO CONSUMO

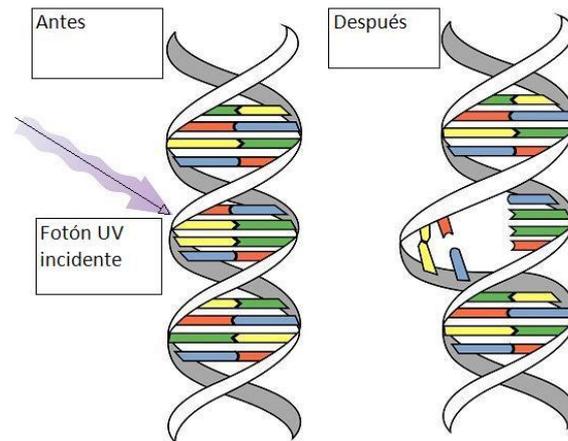


Figura 4. Alteración de la estructura del ADN por fotón UV incidente.

Las lámparas UV de baja presión irradian aproximadamente el 95% de la energía a una longitud de onda de 253,7 nm, Ésta se encuentra cerca del pico de longitud de onda de absorción del ADN bacteriano. Como hemos dicho, el pico entre 260-265 nm es donde se alcanza la máxima efectividad germicida. Como podemos ver en la siguiente gráfica, la longitud de onda más eficaz para la muerte de *E. coli*, es de aproximadamente 265 nm [12].

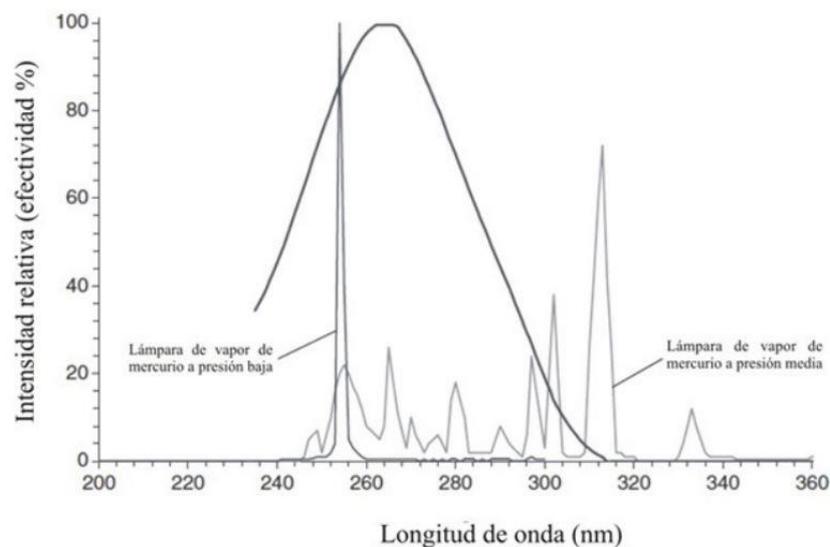


Figura 5. Intensidad relativa respecto a longitud de onda comparando lámparas UV de baja y media presión con la efectividad germicida para *E. coli* [12].

Es importante señalar la baja potencia de emisión y eficiencia cuántica externa (EQE), para los dispositivos UV-LED basados en semiconductores, de bajas longitud de onda. Esta EQE es inferior al 10% cuando se emplean LEDs con una longitud de onda de emisión por debajo de los 300nm [9, 13]. Es por ello que este estudio se ha centrado en el uso de las lámparas de UV-LED de longitudes de onda superiores. A pesar de estar alejadas de la longitud de onda más letal, la relación entre intensidad de luz generada y energía usada es mucho menor que en las lámparas de vapor de mercurio.

### 3.1.2. Caracterización de la fuente ultravioleta

Por medio de actinometría se pretende determinar el flujo de fotones que recibe la muestra de agua a tratar, expresándose en micromoles de fotones por segundo y metro cuadrado ( $\mu\text{moles s}^{-1} \text{m}^{-2}$ ), o lo que es lo mismo:  $\mu\text{Einstein s}^{-1} \text{m}^{-2}$ . Mediante un actinómetro químico (sustancia que sufre una transformación cuantificable al ser sometida a una exposición de fotones) y un espectrofotómetro (Figura 6), calculamos la cantidad de fotones por unidad de tiempo que alcanzan un recipiente. Este recipiente es idéntico al utilizado en las pruebas de desinfección.

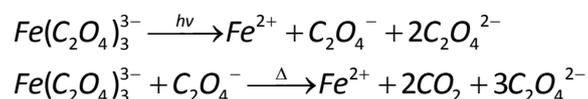


Figura 6. Espectrofotómetro.



Figura 7. Actinometría química.

Utilizamos ferrioxalato de potasio como actinómetro. Su preparación aparece descrita en el anexo I. Este es el actinómetro más recomendado para luz ultravioleta y visible hasta 550 nm de longitud de onda, propuesto por Hatchard y Parker en 1956 [14]. Al entrar en contacto con la luz ultravioleta, el ferrioxalato de potasio se descompone en:



Para determinar el número de fotones que está irradiando la lámpara ultravioleta en sus diferentes posiciones de longitud de onda utilizamos la medición actinométrica [14]. Irradiamos 100 ml con el compuesto actinométrico formado por ferrioxalato de potasio, tal y como se describe en el anexo II. Cada cierto tiempo "t", en segundos, extraemos una alícuota de 1 ml hasta extraer un número adecuado de alícuotas para la realización de la curva de calibrado, como máximo 10, en intervalos de tiempo determinados (segundos). Cada alícuota tomada se introduce en matraces aforados de 25 ml, se añade 1 ml de solución buffer y 2,5 ml de fenantrolina para la medición espectrofotométrica. La fenantrolina se combina con el  $\text{Fe}^{2+}$  creando un compuesto coloreado cuya concentración puede cuantificarse mediante espectrofotometría. Después de enrasar los matraces de 25 ml se espera media hora antes de medir. El blanco requerido para la medición espectrofotométrica se prepara mezclando el buffer y la fenantrolina pero sin la muestra irradiada y enrasando con agua destilada. Se mide el compuesto mediante el espectrofotómetro a 510 nm. El compuesto puede adquirir un amplio rango de tonalidades, que van del anaranjado al rojizo, dependiendo del tiempo de exposición del actinómetro a la luz ultravioleta. Mediante los valores de la absorbancia a lo

## REDUCCIÓN DE PATÓGENOS EN AGUA DE CONSUMO Y REUTILIZADAS MEDIANTE APLICACIÓN DE LUZ ULTRAVIOLETA DE BAJO CONSUMO

largo del tiempo podemos construir la curva de calibrado (Figura 7) para la fuente de luz ultravioleta empleada para desinfección.

Los rendimientos cuánticos del ferrioxalato de potasio ( $\phi_{Fe^{2+}}$ ), es decir el número de átomos de hierro liberados por cada fotón incidente, s en función de las longitudes de onda de las lámparas utilizadas son los siguientes [15]:

$$254\lambda \text{ (nm) a } [Fe(C_2O_4)_3^{-3}] \text{ 0.006M, } \phi_{Fe^{2+}} = 1.25$$

$$366\lambda \text{ (nm) a } [Fe(C_2O_4)_3^{-3}] \text{ 0.006M, } \phi_{Fe^{2+}} = 1.21$$

$$365\lambda \text{ (nm) a } [Fe(C_2O_4)_3^{-3}] \text{ 0.006M, } \phi_{Fe^{2+}} = 1.21$$

$$385\lambda \text{ (nm) a } [Fe(C_2O_4)_3^{-3}] \text{ 0.006M, } \phi_{Fe^{2+}} = 1.13$$

$$395\lambda \text{ (nm) a } [Fe(C_2O_4)_3^{-3}] \text{ 0.006M, } \phi_{Fe^{2+}} = 1.13$$

No aparecen en la bibliografía todos los valores de rendimientos cuánticos para cada longitud de onda que emiten las lámparas utilizadas, por lo tanto, escogemos los valores de rendimientos cuánticos que más se aproximen a la longitud de onda que se esté usando.

En la siguiente tabla se recogen los rendimientos cuánticos ensayados para diferentes longitudes de onda.

| $\lambda$ (nm)     | $[\text{Fe}(\text{C}_2\text{O}_4)_3^{3-}]$<br>(mol L <sup>-1</sup> ) | $\Phi_{\text{Fe}^{2+}}$ | Ref.           |
|--------------------|----------------------------------------------------------------------|-------------------------|----------------|
| 222                | 0.006 <sup>b</sup>                                                   | 0.50                    | [7901]         |
| 230                | 0.006 <sup>b</sup>                                                   | 0.67                    | [7901]         |
| 238-240            | 0.006 <sup>b</sup>                                                   | 0.68                    | [7901]         |
| 248                | 0.006 <sup>b</sup>                                                   | 1.35                    | [7901]         |
| 254                | 0.006                                                                | 1.25 <sup>c</sup>       | [5601]         |
| 254                | 0.005                                                                | 1.25                    | [5501]         |
| 297/302            | 0.006                                                                | 1.24 <sup>c</sup>       | [5601]         |
| 313                | 0.006                                                                | 1.24                    | [5601]         |
| 334                | 0.006                                                                | 1.23 <sup>c</sup>       | [5601]         |
| 358                | 0.006                                                                | 1.25                    | [6601]         |
| 363.8 <sup>d</sup> | 0.006                                                                | 1.28                    | [8101]         |
| 365.6              | 0.006                                                                | 1.21 <sup>c</sup>       | [5601]         |
| 365.6              | 0.005                                                                | 1.20                    | [5501]         |
| 365.6              | 0.006                                                                | 1.26                    | [6401], [6601] |
| 392                | 0.006                                                                | 1.13                    | [6601]         |
| 405-407            | 0.006                                                                | 1.14 <sup>c</sup>       | [5601]         |
| 406.7 <sup>d</sup> | 0.006                                                                | 1.19                    | [8101]         |
| 416                | 0.006                                                                | 1.12                    | [6601]         |
| 436                | 0.006                                                                | 1.11 <sup>c</sup>       | [5601]         |
| 436                | 0.15                                                                 | 1.01                    | [5601]         |
| 436                | 0.005                                                                | 1.07                    | [5501]         |
| 458 <sup>d</sup>   | 0.15                                                                 | 0.85                    | [8101]         |
| 458 <sup>d</sup>   | 0.015                                                                | 1.10                    | [8102]         |
| 468                | 0.15                                                                 | 0.93                    | [5601]         |
| 480                | 0.15                                                                 | 0.94                    | [5601]         |
| 488 <sup>d</sup>   | 0.08                                                                 | 1.08                    | [8102]         |
| 509                | 0.15                                                                 | 0.86                    | [5601]         |
| 514.5 <sup>d</sup> | 0.16-0.20                                                            | 0.90                    | [8102]         |
| 520 <sup>d</sup>   | 0.15                                                                 | 0.65 <sup>e</sup>       | [8301]         |
| 530 <sup>d</sup>   | 0.15                                                                 | 0.53 <sup>e</sup>       | [8301]         |
| 546                | 0.15                                                                 | 0.15                    | [5601]         |
| 550 <sup>d</sup>   | 0.15                                                                 | 0.15 <sup>e</sup>       | [8301]         |

Tabla 2. Rendimiento cuántico en función de la longitud de onda para la producción de iones ferrosos.

Para calcular los moles de iones ferrosos formados en el volumen irradiado empleamos la siguiente ecuación (1) [15]:

$$\text{Moles Fe}^{2+} = \frac{V_1 \cdot V_3 \cdot \Delta A(510\text{nm})}{10^3 \cdot V_2 \cdot I \cdot \varepsilon(510\text{nm})} \quad (1)$$

Donde:

## REDUCCIÓN DE PATÓGENOS EN AGUA DE CONSUMO Y REUTILIZADAS MEDIANTE APLICACIÓN DE LUZ ULTRAVIOLETA DE BAJO CONSUMO

**V<sub>1</sub>**: Es el volumen irradiado, 100 ml.

**V<sub>2</sub>**: Es la parte alícuota de la solución irradiada tomada para la determinación de los iones ferrosos, 1 ml.

**V<sub>3</sub>**: Es el volumen final después de la complejación con fenantrolina, 25 ml.

**l**: Es la longitud de la trayectoria óptica de la célula de irradiación, 1 cm.

**ΔA (510 nm)**: Es la diferencia óptica de la absorbancia entre la solución irradiada y la que se toma en la oscuridad.

**ε (510 nm)**: Es la conversión al complejo de tris-fenantrolina coloreado, complejo Fe(phen)<sub>3</sub><sup>2+</sup>, (ε = 11100 L mol<sup>-1</sup> cm<sup>-1</sup>).

Por lo tanto, los moles de fotones absorbidos por la solución irradiada por unidad de tiempo (Nhv / t) se calculan por medio de la ecuación (2):

$$Nhv / t = \frac{\text{molesFe}^{2+}}{\Phi_{\lambda} \cdot t \cdot F} \quad (2)$$

Donde:

**Φ<sub>λ</sub>**: Es el rendimiento cuántico de la producción de iones ferrosos en la longitud de onda de irradiación (ver tabla 2).

**t**: Es el tiempo de irradiación.

**F**: Es la fracción media de luz absorbida por la solución de ferrioxalato. Al ser la luz UV usada monocromática, toma el valor de 1 [15].

### 3.1.2.1. Lámpara ultravioleta convencional

La lámpara UV convencional que utilizamos para el trabajo es de vapor de mercurio de baja presión y consta de dos posiciones de longitud de onda. Esta lámpara puede emitir a una longitud de onda de 254 nm o 366 nm.



Figura 8. Detalle, lámpara de vapor de mercurio con 2 posiciones de longitud de onda: 254 nm y 366 nm.

## REDUCCIÓN DE PATÓGENOS EN AGUA DE CONSUMO Y REUTILIZADAS MEDIANTE APLICACIÓN DE LUZ ULTRAVIOLETA DE BAJO CONSUMO

Se estableció la curva de calibrado de la lámpara UV convencional para la longitud de onda de 254 nm y de 366 nm respectivamente, ambas con extracciones de 1 ml de muestra cada 30 segundos y con agitación. Se hicieron 3 repeticiones para cada longitud de onda (ver anexo III).

La lámpara convencional tiene una potencia de consumo de 13,5 W y resultó una potencia de radiación de 0.10 y 0.13 W, para 254 y 366 nm, respectivamente.

### 3.1.2.2. Lámpara UV-LED

La fuente de luz UV-LED empleada en este trabajo consta de:

1. Una placa con 3 grupos de diodos LED de 365, 385, y 395 nm de longitud de onda. Cada grupo está formado por 10 diodos distribuidos de forma homogénea por toda la superficie emisora de irradiación.
2. Un transformador con su controlador para cada grupo de LEDs, uno para 365 nm, otro para 385 nm, y el otro para 395 nm.
3. Soporte para colocar la placa de LEDs y la cubeta de reacción: Dispone de 2 orificios para facilitar la extracción de alícuotas de la muestra de agua.
4. Voltímetro: Indica el voltaje con que se está alimentando los LEDs.
5. Amperímetro/regulador de intensidad: Permite modificar el amperaje para ajustar la potencia deseada para la desinfección.

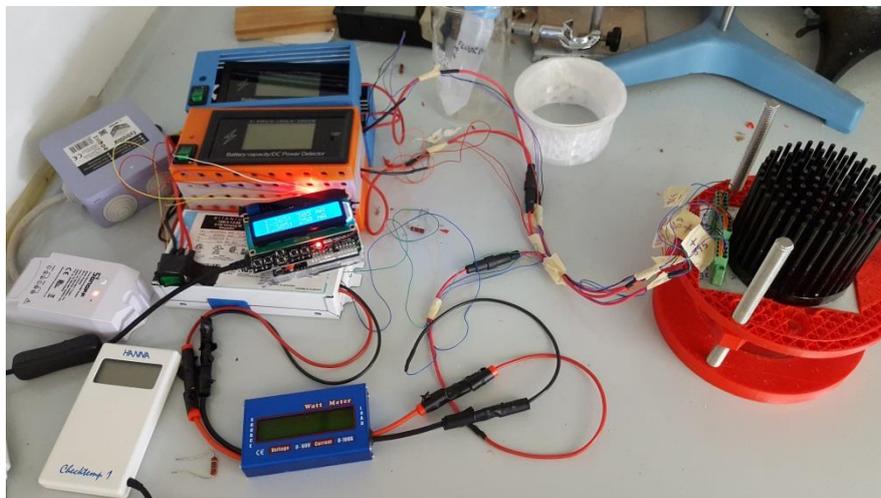


Figura 9. Conjunto lámpara UV-LED.

Se estableció la curva de calibrado de la lámpara UV LED para cada longitud de onda (395, 385 y 365 nm, respectivamente) mediante técnica actinométrica utilizando el actinómetro de ferrioxalato de potasio mencionado en el punto 3.1.2. Para obtener las curvas de calibrado se realizaron extracciones de 1 ml de la solución con el actinómetro a los 2, 3, 5, 10, 15, 30 y 45 segundos de irradiación, aproximadamente, y con agitación. Se hicieron 3 repeticiones para cada longitud de onda (ver anexo III).

### 3.2. Luz visible

La fuente de luz LED visible empleada para realizar las pruebas de desinfección consta de los siguientes elementos:

1. Placa LED de 0,08 m<sup>2</sup> de superficie donde van insertados cada uno de los LED emisores de luz.
2. Dos controladores para transformar la corriente de alimentación de alterna a continua.
3. Regulador de intensidad, para el control de la potencia aplicada.

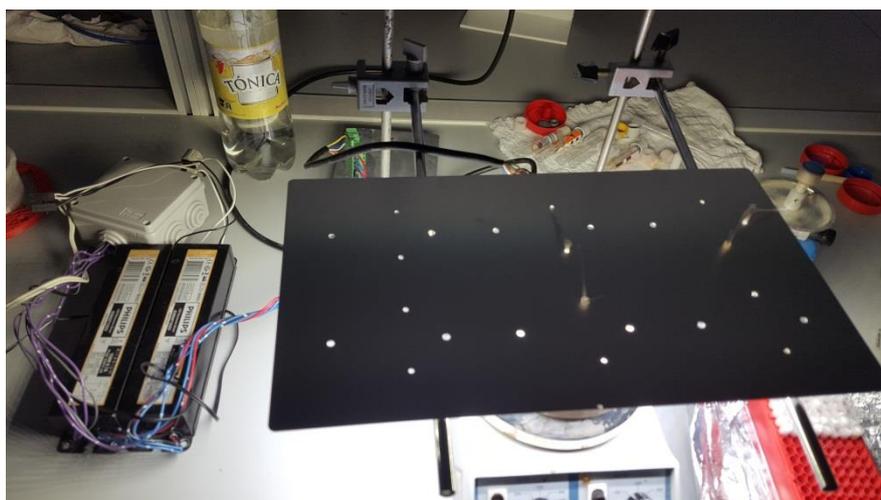


Figura 10. Conjunto lámpara LED visible.

#### 3.2.1. Caracterización de la fuente de luz visible

Para determinar el flujo de fotones que recibe la muestra de agua a tratar, procedente de la lámpara LED visible, expresándose en micromoles de fotones por segundo y m<sup>2</sup>, se emplea el procedimiento similar al de las lámparas UV, salvo que en este caso empleamos una concentración 0,15 M del actinómetro Ferrioxalato potásico, es decir se irradia una disolución que se prepara con 7,368 g K<sub>3</sub>Fe(C<sub>2</sub>O<sub>4</sub>)<sub>3</sub> en 100 ml de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,05 M.

Los valores de V<sub>1</sub>, V<sub>2</sub> y V<sub>3</sub> son los mismos que los utilizados para calcular los moles de iones ferrosos (Fe<sup>2+</sup>) de la luz UV (ver ecuación 1) del punto 3.1.2.

A la hora de calcular los moles de fotones absorbidos por la solución irradiada por unidad de tiempo, utilizamos la ecuación 2, similar a la utilizada para luz UV:

$$I_0 = Nh\nu/t = \frac{\text{moles Fe}^{2+}}{\Phi_\lambda \cdot t \cdot F} \quad (2)$$

Donde moles de Fe<sup>2+</sup>/t representa la pendiente calculada anteriormente, F es la fracción promedio de luz absorbida por la solución de ferrioxalato (F=1 si consideramos que el reactor es un cuerpo negro y los fotones emitidos no pueden, idealmente, escapar del reactor, por lo

## REDUCCIÓN DE PATÓGENOS EN AGUA DE CONSUMO Y REUTILIZADAS MEDIANTE APLICACIÓN DE LUZ ULTRAVIOLETA DE BAJO CONSUMO

que Intensidad de absorción = Intensidad de irradiación),  $\Phi_\lambda$  es el rendimiento cuántico de producción de ion ferroso (toma valores diferentes según sea la longitud de onda, ver tabla 2).

En este caso, no existe una única longitud de onda, ya que la lámpara es policromática, por lo que tenemos que integrar a todas las longitudes de onda, obteniendo la expresión:

$$I_0 = \int_{\lambda} I_0(\lambda) \cdot d\lambda \quad (3)$$

El actinómetro tiene un rendimiento hasta 550 nm y, por lo tanto, se debe integrar la siguiente ecuación de la gráfica.

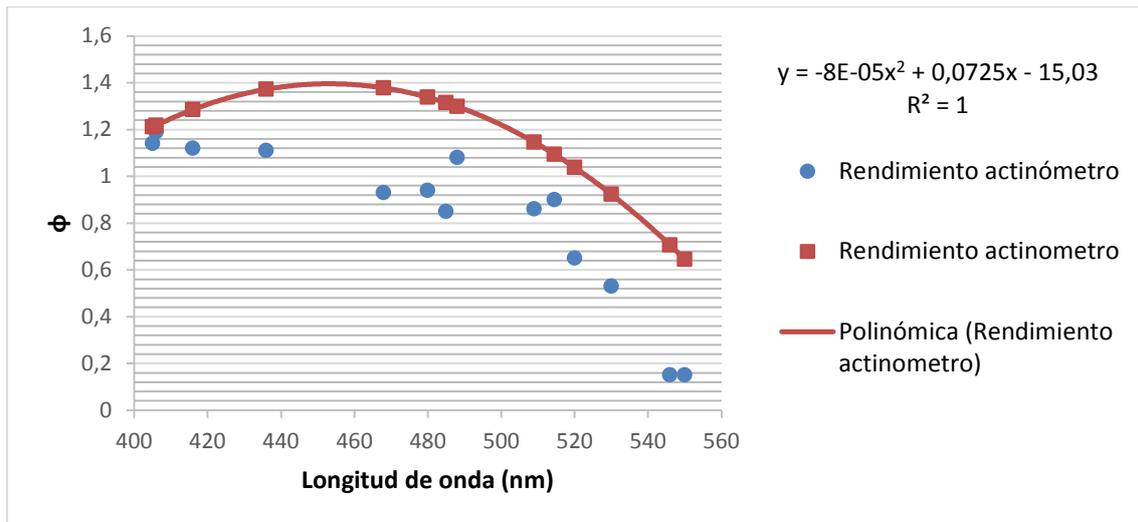


Figura 11. Curva de rendimiento actinométrico.

Según las longitudes de onda, que van desde 400 hasta 550 nm, siguen una expresión cuadrática (ver tabla 2). Por lo tanto, solamente es necesario integrar entre 400 y 550 nm. Sabiendo los moles de hierro y el tiempo de irradiación durante la actinometría podemos aplicar la siguiente ecuación:

$$I_0 = \int_{250}^{550} \frac{\text{moles Fe}^{2+}}{F \cdot t \cdot \Phi(\lambda)} d\lambda = \left[ \frac{\text{moles Fe}^{2+}}{t} \right] \cdot \left( \int_{250}^{400} \frac{d\lambda}{1,23} + \int_{400}^{550} \frac{d\lambda}{-0,00008 \cdot \lambda^2 + 0,0725 \cdot \lambda - 15,03} \right)$$

$$\int_{400}^{550} \frac{d\lambda}{-0,00008 \cdot \lambda^2 + 0,0725 \cdot \lambda - 15,03} = \frac{1}{-0,00008} \int_{400}^{550} \left( \frac{-0,0038}{\lambda - 321,04} + \frac{0,0038}{\lambda - 585,21} \right) \cdot d\lambda = \frac{0,0038}{-0,00008} \ln \left| \frac{\lambda - 585,21}{\lambda - 321,04} \right|_{400}^{550} = 128,9$$

Una vez calculada la integral, ya se obtiene el valor de  $I_0$  (moles de fotones/seg = Einsteins/seg) [15, 26]. La potencia de irradiación por  $\text{m}^2$  resultó de 20520,4 micromoles de fotones  $\text{s}^{-1} \text{m}^{-2}$  (ver anexo III).

### 3.3. Agua residual EDAR de Medinaceli

Se extrajeron muestras del efluente secundario de la estación depuradora de aguas residuales de Medinaceli (Soria). En cada ensayo se irradiaron 100 ml de la muestra, extrayendo alícuotas de 2 ml en el tiempo 0 (antes de irradiar), y a los 4, 8, 15, 30, 45, y 60 minutos de tratamiento. Las bacterias coliformes que sobrevivieron a la irradiación ultravioleta se contabilizaron mediante recuento en placas Petri con agar selectivo para coliformes.

Se realizaron análisis en el laboratorio del agua residual, con el fin de conocer diferentes parámetros de cada una de las muestras obtenidas como: DQO, sólidos en el agua, pH del agua, conductividad eléctrica (ver anexo V).

El parámetro que más afecta a la eficiencia de desinfección con luz ultravioleta es la cantidad de sólidos totales (SST). La turbidez del agua está relacionada con la presencia de sólidos en suspensión. A mayor cantidad de sólidos en suspensión, mayor será la turbidez del agua. Las bacterias se protegen de la radiación ultravioleta incidente, durante el tratamiento de depuración del agua, por medio de las partículas en suspensión, impidiendo que los rayos ultravioleta alcancen a las bacterias. Por lo tanto, a mayor número de sólidos en suspensión, la eficiencia de la desinfección mediante luz ultravioleta se puede ver reducida [16]. Las analíticas resultaron similares en las distintas muestras de agua tratadas (ver anexo V)

### 3.4. Medios de cultivo

Para la determinación de las unidades formadoras de colonias (UFC) de bacterias coliformes en el agua contaminada se emplean placas Petri con dos tipos de agar para coliformes: m-FC Agar (de color rojo) y Chromocult® Coliformes Agar (de color amarillo). Ambos sirven para la detección simultánea de bacterias coliformes y *E.coli* en el agua potable, aguas con baja flora bacteriana de fondo y muestras de alimentos procesados. Las características de los medios de cultivo empleados aparecen detallados en el Anexo IV.

En los ensayos realizados distinguimos los siguientes tipos de bacterias coliformes y no coliformes:

| m-FC Agar (color rojo)        |               | Chromocult® Coliformes Agar (color amarillo)                                |               |
|-------------------------------|---------------|-----------------------------------------------------------------------------|---------------|
| Especie                       | Color colonia | Especie                                                                     | Color colonia |
| <i>E. coli</i>                | Azul          | <i>E. coli</i>                                                              | Azul          |
| <i>Enterobacter aerogenes</i> | Roja          | <i>Enterobacter aerogenes, Citrobacter freundii y Klebsiella pneumoniae</i> | Roja          |
|                               |               | <i>Enterococcus faecalis y Pseudomonas aeruginosa*</i>                      | Blanca        |

\**Enterococcus faecalis* y *Pseudomonas aeruginosa* no pertenecen al grupo de bacterias coliformes [18].

Tabla 3. Diferenciación de UFC según su color.

Se realizaron ensayos por duplicado en idénticas condiciones, utilizando placas Petri con los dos medios de cultivo diferentes. Con las placas Petri Chromocult® Coliformes Agar (de color amarillo), se observa una mayor diferenciación entre UFC pertenecientes a las especies de

## REDUCCIÓN DE PATÓGENOS EN AGUA DE CONSUMO Y REUTILIZADAS MEDIANTE APLICACIÓN DE LUZ ULTRAVIOLETA DE BAJO CONSUMO

bacterias estudiadas, que con las placas Petri m-FC Agar (de color rojo), por lo tanto son más fáciles de interpretar los resultados y se opta por realizar la mayor parte de los ensayos con el agar de color amarillo Chromocult®.

Se cultivan 0,5 ml de agua tratada con luz UV en cada placa Petri, para cada tiempo de tratamiento.



Figura 12. Placas Petri Chromocult® Coliformes Agar con bacterias.

Se observaron mayores diferencias de resultados en los ensayos iniciales con las placas Petri Chromocult® Coliformes Agar (de color amarillo), por lo que se decidió continuar el estudio utilizando sólo el agar de color amarillo Chromocult®.

### 3.5. Catalizadores

Para realizar las pruebas de desinfección fotocatalítica para la mejora de la eficiencia de desinfección de las lámparas se empleó el catalizador TiO<sub>2</sub>Degussa P-25, que se añadió al agua, realizando pruebas a una concentración de 0,01 g y 0,02 g de catalizador por 100 ml de agua contaminada. Los catalizadores se mantuvieron en suspensión en el agua y con agitación constante durante la irradiación.

El dióxido de titanio ha demostrado ser el mejor material para la purificación de agua en sistemas fotocatalíticos. El TiO<sub>2</sub> es un material económico y fácil de obtener. Químicamente es un compuesto estable y los estados excitados que se generan por medio de la luz son altamente oxidantes. Además, los fotoelectrones correspondientes tienen suficiente electronegatividad para reducir el dióxígeno a radicales superóxido/ hidroperóxido para efectuar la oxidación profunda de una gran cantidad de compuestos orgánicos, aceites, colorantes, pesticidas, mercaptanos, cianuros, surfactantes, halocarburos, clorofenoles, fenoles, convirtiéndolos en compuestos inocuos como el CO<sub>2</sub> y el H<sub>2</sub>O. La forma anatasa del dióxido de titanio tiene las propiedades de ser químicamente estable, fácilmente disponible y activo como fotocatalizador para procesos de oxidación [23]. Esta capacidad de oxidación es

## REDUCCIÓN DE PATÓGENOS EN AGUA DE CONSUMO Y REUTILIZADAS MEDIANTE APLICACIÓN DE LUZ ULTRAVIOLETA DE BAJO CONSUMO

útil también para la desinfección, ya que los radicales superóxido/hiperóxido atacan a las estructuras celulares creando daños irreversibles en bacterias.

Mediante la desinfección fotocatalítica se consigue un incremento de la eficiencia para la desinfección de microorganismos en el agua. Esto se atribuye al daño oxidativo producido principalmente por especies reactivas de Oxígeno (ROS) en inglés, tales como  $O_2^-$ ,  $H_2O_2$  y  $HO\cdot$ . Estas especies reactivas de oxígeno se producen mediante reacciones redox entre especies adsorbidas (oxígeno y agua) y electrones libres, los cuales son fotogenerados por la absorción de fotones en el  $TiO_2$ . Los radicales  $OH\cdot$  son la causa principal de la eliminación de bacterias *E.coli* [22].

La fotocatalisis comienza cuando los fotones procedentes de la fuente de luz inciden sobre la superficie del fotocatalizador. Cuando la luz posee una longitud de onda superior al espacio de banda del material fotocatalítico, se excitan los electrones ( $e^-$ ) de la banda de conducción del fotocatalizador. Cuando el  $e^-$  abandona la banda de valencia y se absorbe en la banda de conducción se forma un agujero de carga positiva en la banda de valencia. En la banda de conducción el  $e^-$  reacciona con el  $O_2$  para formar radicales superóxido  $O_2^-$ , o radicales de hidroperóxido  $HO_2\cdot$ . Los contaminantes se fotodegradan por las especies reactivas de oxígeno (ROS), mencionadas anteriormente en compuestos como el agua  $H_2O$  y  $CO_2$ . Los radicales superóxido pueden originar una degradación adicional. Además, en la capa de valencia, en el hueco con carga positiva, se produce la oxidación del agua, generando radicales hidróxilo ( $OH\cdot$ ) e iones de hidrógeno ( $H^+$ ). El  $H_2O$  y el  $CO_2$  se forman cuando las sustancias contaminantes reaccionan con los radicales hidroxilo [25].

Para que se dé una fotoinactivación efectiva los microorganismos deben tener interacciones superficiales con el fotocatalizador. Las especies reactivas de oxígeno (ROS) que se generan durante la fotocatalisis, dañan la pared celular de los microorganismos. Las ROS rompen en primer lugar la capa de liposacáridos de la pared celular; esto hace que se dañe la capa de peptidoglicano, se produzca la peroxidación de la membrana lipídica y la oxidación de la membrana de las proteínas. Con estas capas bacterianas dañadas, los iones de potasio del interior se filtran, la célula pierde sus funciones y en última instancia la célula muere [25].

### 3.6. Método de determinación de efecto germicida

Para evaluar el potencial de desinfección de cada fuente de luz ultravioleta, se empleó agua de la depuradora EDAR de Medinaceli (Soria). Se introdujeron 100 ml de agua contaminada en la cubeta de reacción bajo la lámpara UV-LED, en constante agitación. La luz incide perpendicularmente sobre la superficie del agua a tratar. La columna de agua a tratar tiene 1 cm aproximado de altura.

Se determinaron 7 alícuotas compuestas por 2ml de agua, las cuales se extrajeron de la cubeta de reacción, una en el tiempo 0 (sin irradiar) y después cada 4, 8, 15, 30, 45, y 60 min.

De cada alícuota se introdujo 0,5 ml en dos placas Petri con agar Chromocult® Coliformes Agar (de color amarillo) y otros 0,5 ml en las otras dos placas Petri m-FC Agar (de color rojo). De esta forma se realizan pruebas por duplicado en idénticas condiciones. La técnica de cultivo se

## REDUCCIÓN DE PATÓGENOS EN AGUA DE CONSUMO Y REUTILIZADAS MEDIANTE APLICACIÓN DE LUZ ULTRAVIOLETA DE BAJO CONSUMO

realizó mediante filtración, utilizando filtros de éster de celulosa mixta (GN-6 Metricel® 0,45 µm 50mm S-Pack White Gridded 200/pk) para eliminar el agua sobrante. El filtro con las bacterias retenidas se colocó sobre el agar de las placas Petri.

Las placas Petri se introdujeron en una incubadora colocándolas de forma invertida para evitar condensación. Esta condensación puede dar lugar a una lectura errónea [17]. La temperatura se establece a 37°C. Transcurridas entre 18 y 24 h se realiza el recuento de las colonias.

Para el cálculo del porcentaje de supervivencia de las bacterias en el agua se emplea la siguiente ecuación (4):

$$\% \text{supervivencia} = \frac{N}{N_0} \cdot 100 \quad (4)$$

Donde:

N: es el número de bacterias después de irradiar un tiempo t.

N<sub>0</sub>: es el número de bacterias antes de la prueba de irradiación.

Para calcular el logaritmo de inactivación empleamos la siguiente ecuación (5):

$$\text{Log in} = \log_{10} \frac{N_0}{N} \quad (5)$$

Los resultados obtenidos de los ensayos de desinfección: número de bacterias, porcentaje de supervivencia y logaritmo de inactivación, aparecen graficados en el Anexo VI.

Con el fin de determinar la capacidad de reactivación de las bacterias, se cultivaron otras dos placas Petri (por duplicado) 6 horas después de finalizar la prueba de irradiación. Se cultivaron 0,5 ml de muestra, del último tiempo de irradiación. De esta forma se asegura de que los datos obtenidos no proceden de una simple inactivación y de que la lámpara mata los microorganismos sin posibilidad de que estos puedan autorrepararse.

Mediante la siguiente fórmula (6) se calcula el porcentaje de reactivación:

$$\text{Porcentaje de reactivación \%} = \frac{N_t - N}{N_0 - N} \cdot 100 \quad (6)$$

Donde:

N<sub>0</sub> es el número de bacterias antes de la radiación.

N es el número de bacterias después de la radiación.

N<sub>t</sub> es el número de bacterias después de la reactivación en un tiempo t.

De esta forma, evaluamos el efecto de la reactivación, tanto si se debe a mecanismos de fotorreactivación o de reparación en la oscuridad [21].

## REDUCCIÓN DE PATÓGENOS EN AGUA DE CONSUMO Y REUTILIZADAS MEDIANTE APLICACIÓN DE LUZ ULTRAVIOLETA DE BAJO CONSUMO

Para evitar la contaminación de las muestras tratadas durante el cultivo, al pasar de un tiempo de irradiación al siguiente, se desinfectó todo el material, tanto pinzas como el embudo y filtro realizando el cultivo en una campana de flujo laminar.



Figura 13. Material para cultivo en campana de flujo laminar.

El material utilizado durante la prueba es previamente esterilizado en autoclave durante 40 minutos, a una temperatura de 110°C, y una presión de 1,5 bar.

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

##### 4.1. Caracterización de la fuente de luz ultravioleta

Para establecer la dosis de irradiación adecuada a la hora de la desinfección es necesario conocer que cantidad de energía que se aplica en cada momento para cada lámpara. Para ello se calculó la potencia de irradiación. También se cuantificó la potencia de consumo con el fin de conocer la eficiencia de cada lámpara y el consumo de energía real en la desinfección.

Los resultados del estudio de la potencia de irradiación, mediante actinómetro químico, a las distintas longitudes de onda para los dos tipos de lámparas UV (Vapor de mercurio y UV-LED), así como las potencias de consumo eléctrico y eficiencia para cada lámpara aparecen en la siguiente tabla.

|                                    | Potencia irradiación (W) | Potencia irradiación (W/m <sup>2</sup> ) | Potencia consumo (W) | Potencia consumo (W/m <sup>2</sup> ) | Eficiencia % |
|------------------------------------|--------------------------|------------------------------------------|----------------------|--------------------------------------|--------------|
| Lámpara convencional 254 nm, 13,5W | 0,10                     | 16,17                                    | 13,50                | 2122,07                              | 0,76         |
| Lámpara convencional 366 nm, 13,5W | 0,13                     | 21,12                                    | 13,50                | 2122,07                              | 1,00         |
| Lámpara LED 365 nm, 8W (10*)       | 3,58                     | 562,74                                   | 8,00                 | 1257,52                              | 44,75        |
| Lámpara LED 385 nm, 8W             | 1,17                     | 183,66                                   | 8,00                 | 1257,52                              | 14,61        |
| Lámpara LED 395 nm, 8W             | 2,76                     | 433,80                                   | 8,00                 | 1257,52                              | 34,50        |
| Lámpara LED 365 nm, 13,5W (8*)     | 4,65                     | 730,41                                   | 13,50                | 2122,07                              | 34,42        |
| Lámpara LED 365 nm, 3,75W (8*)     | 1,44                     | 225,63                                   | 3,75                 | 589,46                               | 38,28        |
| Lámpara LED 385 nm, 3,75W          | 0,42                     | 66,78                                    | 3,75                 | 589,46                               | 11,33        |
| Lámpara LED 395 nm, 3,75W          | 1,53                     | 240,86                                   | 3,75                 | 589,46                               | 40,86        |
| Lámpara LED 385 nm, 13,5W          | 1,80                     | 282,26                                   | 13,50                | 2122,07                              | 13,30        |
| Lámpara LED 395 nm, 13,5W          | 4,03                     | 633,45                                   | 13,50                | 2122,07                              | 29,85        |
| Lámpara LED 365 nm, 8W (8*)        | 2,46                     | 386,22                                   | 8,00                 | 1257,52                              | 30,71        |

Tabla 4. Potencia de irradiación, de consumo y eficiencia de las lámparas UV.

La eficiencia se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$E(\%) = \frac{P_i}{P_c} \cdot 100 \quad (7)$$

Donde:

$P_i$ : es la potencia de irradiación de la lámpara.

$P_c$ : es la potencia de consumo eléctrico de la lámpara.

Es posible modificar la potencia de consumo de la lámpara UV-LED. Sin embargo, la lámpara UV convencional posee una potencia fija de 13,5 W, sin posibilidad de modificación.

La lámpara UV-LED posee una eficiencia unas 30 veces mayor que la lámpara UV convencional de vapor de mercurio.

## REDUCCIÓN DE PATÓGENOS EN AGUA DE CONSUMO Y REUTILIZADAS MEDIANTE APLICACIÓN DE LUZ ULTRAVIOLETA DE BAJO CONSUMO

Durante el transcurso de la investigación se fundieron 2 LEDs de la lámpara UV-LED 365 nm. Por lo tanto la eficiencia de desinfección se calculó empleando los datos de energía de irradiación obtenidos por la actinometría al emplear 10 LEDs y 8 LEDs. No se pueden sustituir sin construir toda la lámpara de nuevo, por los que se decidió realizar los ensayos correspondientes con 8 LEDs.

Para una potencia de consumo de la lámpara UV-LED 365 de 8 W con los 10 LEDs, le corresponde una potencia de irradiación de la lámpara de unos 3,58 W; sin embargo, funcionando 8 LEDs la potencia de irradiación disminuye a 1,44 W (ver Tabla 4).

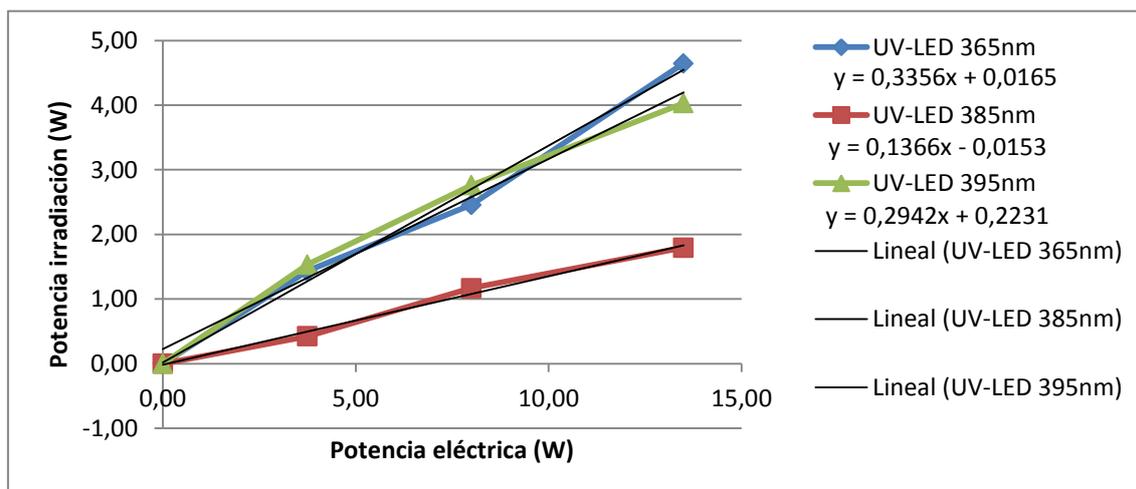


Figura 14. Potencia de irradiación frente a potencia de consumo de las lámparas UV-LED.

Las lámparas UV-LED de 365 y 395 nm mostraron un incremento similar en la potencia irradiada respecto a la potencia eléctrica, alcanzando valores entre 4,03 y 4,65 W (irradiación) al aplica la máxima potencia eléctrica (13,5 W). Sin embargo la lámpara de 385 nm mostró un rendimiento más bajo con valores 1,80 W para la misma potencia eléctrica. Esto se debe seguramente a las mayores pérdidas por difracción del haz de luz hacia el exterior del reactor debido a la diferente geometría de los diodos.

En el Anexo III se adjuntan los datos obtenidos para cada longitud de onda empleada y los respectivos gráficos de cada ensayo.

### 4.2. Caracterización de la fuente de luz visible

Para calcular la eficiencia se empleó semejante metodología que para las lámparas UV-LED utilizando la potencia de consumo e irradiada en ( $W/m^2$ ). Los resultados de la potencia irradiada y de consumo obtenidos respectivamente mediante el potenciómetro y actinometría se recogen en la siguiente tabla:

| Tipo de lámpara                   | Potencia irradiada (W) | Potencia irradiada (W/m <sup>2</sup> ) | Potencia consumo (W) | Potencia consumo (W/m <sup>2</sup> ) | Eficiencia % |
|-----------------------------------|------------------------|----------------------------------------|----------------------|--------------------------------------|--------------|
| <b>Lámpara LED 400-700 29,25W</b> | 1,55                   | 243,74                                 | 29,25                | 365,625                              | 66,67        |

Tabla 5. Potencia irradiada, de consumo y eficiencia para la lámpara LED visible.

#### 4.3. Eliminación de coliformes en agua residual

Después de irradiar la muestra de agua contaminada, se cultivó en placas Petri para después realizar el conteo de las unidades formadoras de colonias (UFC). Dichas colonias se clasificaron según la especie que corresponde, gracias a que con el medio de cultivo se consigue una correcta diferenciación y enumeración de coliformes fecales en aguas residuales (ver anexo IV).

De todas los ensayos realizados, la mayor eficiencia de desinfección se consiguió con las lámparas convencionales usando longitudes de onda de 254 nm de, con esta longitud de onda se eliminaron 128 UFC en 1,5 minutos de irradiación, este tiempo es mucho menor que para el resto de longitudes de onda empleadas. Esta longitud de onda funcionó mejor ya que se encuentra próxima al pico de absorción del ADN bacteriano 265 nm.

Dentro de las lámparas LED, la mayor eficiencia se consiguió con la lámpara de menor longitud de onda UV-LED 365 nm que la convencional 366 nm. La UV-LED 365 nm a 13,5 W consigue una desinfección partiendo de 147 UFC/0,5ml al inicio de la prueba hasta 3 UFC/0,5ml al final de la prueba en 60 minutos. En el caso de lámparas convencionales, con una longitud de onda prácticamente igual, 366, el rendimiento de desinfección fue mucho menor a 13,5 W la irradiación consiguió partiendo de 171 UFC/0,5ml llegar a 74 UFC/0,5ml en 60 minutos.

La presencia de catalizadores aumentó los rendimientos de desinfección. Al aplicar 0,02 g de catalizador TiO<sub>2</sub> Degussa P-25 se alcanza una mayor desinfección con la lámpara UV-LED 395 nm que con la lámpara UV-LED 385nm. Con la UV-LED 395 nm, partiendo de 95 UFC/0,5ml, transcurridos 30 min de irradiación solamente queda 1 UFC/0,5ml. Con la lámpara 385 nm partiendo de 76 UFC/0,5ml, transcurridos 30 minutos de irradiación quedan 11 UFC/0,5ml.

Con la lámpara UV-LED de 365 nm a una potencia de 8 W consigue pasar de 92 UFC/0,5m la 18 transcurridos 60 min y al aumentar la potencia a 13,5 W se pasa de 147 a 3 UFC/0,5ml en 60 minutos de irradiación, por lo tanto al incrementar la potencia se consigue una mayor desinfección.

#### 4.4. Cuantificación de la capacidad de inactivación de las lámparas UV

La capacidad de inactivación respecto a la dosis de irradiación ultravioleta se expresa como: energía aplicada para alcanzar una tasa de inactivación expresada comologaritmo en base 10 de bacterias eliminadas, (Dosis UV (mJ/cm<sup>2</sup>))/log inactivación [19]. La capacidad de

## REDUCCIÓN DE PATÓGENOS EN AGUA DE CONSUMO Y REUTILIZADAS MEDIANTE APLICACIÓN DE LUZ ULTRAVIOLETA DE BAJO CONSUMO

inactivación lograda con cada lámpara, para *E. coli* y coliformes totales se muestra en el Anexo VII.

Para alcanzar un valor de inactivación de 1 log<sub>10</sub> de los coliformes totales iniciales, es necesario aplicar 43,27 mJ/cm<sup>2</sup> de energía de irradiación, a una longitud de onda de 254 nm. Esta es la longitud de onda que menos energía necesita para alcanzar este nivel de inactivación, ya que se encuentra próxima al pico de absorción del ADN bacteriano (265 nm). Esta energía es mucho menor que la que se necesita para el mismo nivel de inactivación con longitudes de onda más elevadas como a 365, 385 y 395 nm. Estas necesitan respectivamente una energía de irradiación de 264.600,63 mJ/cm<sup>2</sup>, 170.044,56 mJ/cm<sup>2</sup> y 206.198,75 mJ/cm<sup>2</sup>. Estos resultados son considerablemente más elevados que para una longitud de onda de 254 nm. Al utilizar catalizadores en longitudes de onda próximas a la visible, la energía de irradiación necesaria para inactivar un valor de 1 log<sub>10</sub> es menor. Utilizando la UV-LED de 395 nm, como se ha comentado, se necesita aplicar 206.198,75 mJ/cm<sup>2</sup> y al aplicar 0,02 g de catalizador TiO<sub>2</sub> Degussa P-25 se reduce la energía de irradiación necesaria a aplicar para conseguir el mismo nivel de inactivación, resultando 35.591,37 mJ/cm<sup>2</sup>.

Para comprobar que las lámparas eliminan las bacterias patógenas, es decir sin posibilidad de que estas se reparasen, se comprobó si en transcurridas 6h de finalizar la irradiación, las bacterias se autorreparaban. Los resultados obtenidos fueron negativos, no apareció un número mayor de bacterias transcurridas 6 h que inmediatamente después de la irradiación, es decir el número de bacterias no aumento pasadas 6 h de la irradiación.

### 4.5. Análisis energético

Con el fin de comparar los consumos de las diferentes lámparas utilizadas para la desinfección, calculamos la energía eléctrica consumida para alcanzar un logaritmo de inactivación utilizamos la expresión: Energía consumo/logaritmo inactivación, en unidades (mJ/cm<sup>2</sup>)/log in.

En la siguiente tabla aparecen resumidos los valores de energía obtenidos para cada logaritmo de inactivación, tanto para *E. coli* como para coliformes totales.

| Desinfección de <i>E. Coli</i>                       |                                                              |                                                          |
|------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Tipo de lámpara                                      | Energía irradiación/log in<br>((mJ/cm <sup>2</sup> )/log in) | Energía consumo/log in<br>((mJ/cm <sup>2</sup> )/log in) |
| Lámpara LED 385nm, 8W. 0,01g TiO <sub>2</sub> (P-25) | -                                                            | -                                                        |
| Lámpara LED 395nm, 8W. 0,01g TiO <sub>2</sub> (P-25) | -                                                            | -                                                        |
| Lámpara convencional 254nm                           | 48,28                                                        | 6.335,66                                                 |
| Lámpara LED 395nm, 8W. 0,02g TiO <sub>2</sub> (P-25) | 34.416,30                                                    | 99.766,95                                                |
| Lámpara LED visible, 29,25W.                         | 86.840,49                                                    | 130.263,70                                               |
| Lámpara LED 385nm, 8W                                | 24.552,00                                                    | 168.106,14                                               |
| Lámpara LED 395nm, 8W                                | 58.475,09                                                    | 169.509,27                                               |
| Lámpara LED 395nm, 8W. 0,01g (TiO <sub>2</sub> )     | 70.612,06                                                    | 204.692,25                                               |
| Lámpara LED 365nm, 8W (10*)                          | 98.025,61                                                    | 219.051,48                                               |
| Lámpara LED 365nm, 13,5W (8*)                        | 93.704,96                                                    | 272.243,20                                               |

REDUCCIÓN DE PATÓGENOS EN AGUA DE CONSUMO Y REUTILIZADAS MEDIANTE APLICACIÓN DE LUZ ULTRAVIOLETA DE BAJO CONSUMO

|                                                      |            |              |
|------------------------------------------------------|------------|--------------|
| Lámpara LED 385nm, 8W. 0,02g TiO <sub>2</sub> (P-25) | 39.784,06  | 272.399,24   |
| Lámpara LED visible, 29,25W. (TiO <sub>2</sub> )     | 224.509,40 | 336.771,75   |
| Lámpara LED 385nm, 8W. 0,01g (TiO <sub>2</sub> )     | 64.219,06  | 439.704,35   |
| Lámpara LED 365nm, 8W (8*)                           | 257.184,10 | 837.383,62   |
| Lámpara convencional 366nm                           | 31.002,79  | 3.114.564,18 |

Tabla 6. Comparativa entre energía de irradiación y de consumo para desinfección de *E. coli*.

El agua que se utilizó para la prueba con la lámpara UV-LED 385 y 395nm a 8W con 0,01 g TiO<sub>2</sub> (P-25) carecía de bacterias *E. coli*.

La lámpara que menos energía consume para alcanzar un nivel de inactivación de 1 log<sub>10</sub> de *E. coli* es la UV-convencional 254 nm dado que esta longitud de onda se aproxima a la más letal para la inactivación de microorganismos, la cual es de 265 nm [2]. Si realizamos una comparativa entre longitudes de onda similares, entre la lámpara UV-LED 365 nm a 13,5 W y la lámpara UV-convencional 366 nm a 13,5 W, para la inactivación de un valor de 1 log<sub>10</sub> se necesita aplicar mayor energía eléctrica con la lámpara UV-convencional que con la lámpara UV-LED. Con la lámpara UV-LED 365 nm a 13,5 W se consumen 272.243,20 (mJ/cm<sup>2</sup>)/log in, y con la lámpara UV-convencional 366 nm se consumen 3.114.564,18 (mJ/cm<sup>2</sup>)/log in. Para la misma lámpara LED 365 nm, al aumentar la potencia se produce una pérdida de irradiación por difracción del haz de luz. Por lo tanto, la eficiencia de la lámpara disminuye. Esto se traduce en un mayor gasto de energía por logaritmo de inactivación. Como se muestra en la anterior tabla, la energía consumida por la lámpara UV-LED 365 nm a 8W es de 219.051,48 (mJ/cm<sup>2</sup>)/log in, y la misma lámpara a 13,5 W consume 272.243,20 (mJ/cm<sup>2</sup>)/log in.

| Desinfección de coliformes totales                   |                                                           |                                                       |
|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| Tipo de lámpara                                      | Energía irradiación/log in ((mJ/cm <sup>2</sup> )/log in) | Energía consumo/log in ((mJ/cm <sup>2</sup> )/log in) |
| Lámpara convencional 254nm                           | 43,27                                                     | 5.679,26                                              |
| Lámpara LED 395nm, 8W. 0,02g TiO <sub>2</sub> (P-25) | 35.591,37                                                 | 103.173,28                                            |
| Lámpara LED visible, 29,25W.                         | 142.846,67                                                | 214.274,88                                            |
| Lámpara LED 395nm, 8W. 0,01g (TiO <sub>2</sub> )     | 88.162,62                                                 | 255.568,34                                            |
| Lámpara LED 385nm, 8W. 0,02g TiO <sub>2</sub> (P-25) | 40.895,79                                                 | 280.011,16                                            |
| Lámpara LED 385nm, 8W. 0,01g (TiO <sub>2</sub> )     | 41.273,41                                                 | 282.596,74                                            |
| Lámpara LED 395nm, 8W. 0,01g TiO <sub>2</sub> (P-25) | 124.290,33                                                | 360.296,37                                            |
| Lámpara LED 365nm, 8W (10*)                          | 226.181,19                                                | 505.432,46                                            |
| Lámpara LED visible, 29,25W. (TiO <sub>2</sub> )     | 349.815,23                                                | 524.734,76                                            |
| Lámpara LED 395nm, 8W                                | 206.198,75                                                | 597.734,84                                            |
| Lámpara LED 385nm, 8W. 0,01g TiO <sub>2</sub> (P-25) | 99.682,95                                                 | 682.523,60                                            |
| Lámpara LED 365nm, 8W (8*)                           | 264.600,63                                                | 861.531,62                                            |
| Lámpara LED 385nm, 8W                                | 170.044,56                                                | 1.164.285,59                                          |
| Lámpara LED 365nm, 13,5W (8*)                        | 451.123,13                                                | 1.310.658,56                                          |
| Lámpara convencional 366nm                           | 22.486,99                                                 | 2.259.060,34                                          |

Tabla 7. Comparativa entre energía de irradiación y de consumo para desinfección de coliformes.

## REDUCCIÓN DE PATÓGENOS EN AGUA DE CONSUMO Y REUTILIZADAS MEDIANTE APLICACIÓN DE LUZ ULTRAVIOLETA DE BAJO CONSUMO

Para la desinfección de coliformes totales presentes en el agua. La lámpara UV- convencional 254nm de longitud de onda es la que menos energía gasta para inactivar un valor de 1 log, ya que se encuentra en longitudes cercanas a la letal para los microorganismos. Empleando longitudes de onda similares, la lámpara UV-LED 365 nm a 13,5 W consume 1.310.658,56 (mJ/cm<sup>2</sup> log<sub>10</sub>) y la lámpara convencional 366nm a 13,5W consume 2.259.060,34(mJ/cm<sup>2</sup> log<sub>10</sub>). La lámpara LED 365nm como se ve con la inactivación de *E.coli*, es más eficiente también para coliformes totales empleando 8 W que a 13,5 W de potencia, 505.432,46 (mJ/cm<sup>2</sup>log<sub>10</sub>) y 1.310.658,56 (mJ/cm<sup>2</sup>log<sub>10</sub>) respectivamente, esto es más del doble. Las lámparas UV-LED 365 nm, 385 nm y 395 nm de longitud de onda a 8 W de potencia, consumen respectivamente 505.432,46 (mJ/cm<sup>2</sup>log<sub>10</sub>), 1.164.285,59(mJ/cm<sup>2</sup>log<sub>10</sub>), 597.734,84(mJ/cm<sup>2</sup>log<sub>10</sub>).

Esta energía se ve reducida cuando se aplican catalizadores al agua contaminada para las lámparas con longitudes de onda cercanas a la visible, como son las UV-LED de 385 nm y 395 nm.

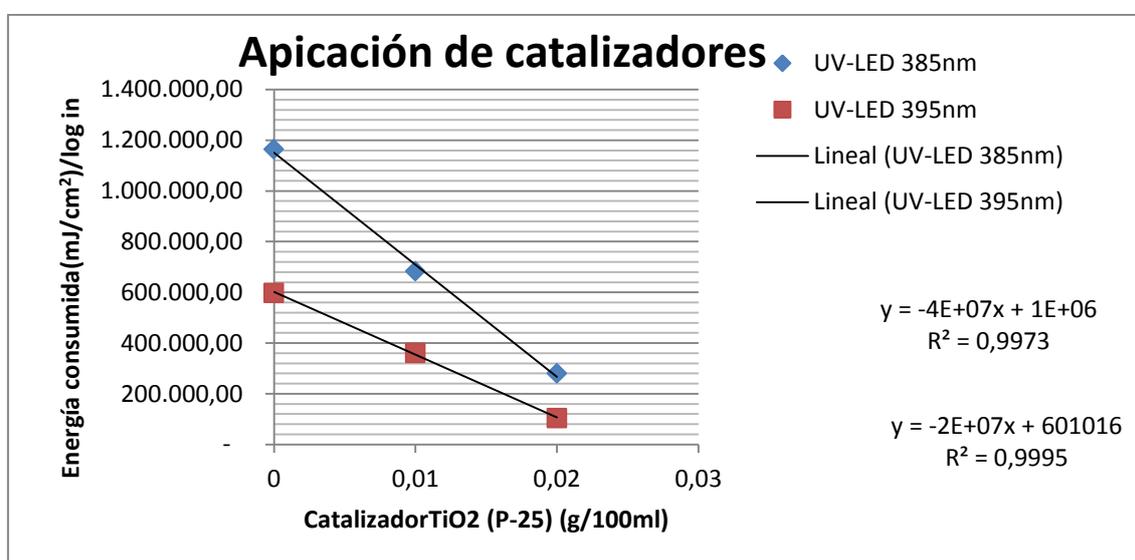


Figura 15. Comparativa aplicación de catalizador consumo de energía.

Al aplicar catalizador al agua contaminada se consigue reducir la energía necesaria para inactivar un valor de 1 log. Con la lámpara UV-LED 385 nm se alcanza una mayor respuesta de disminución energética al aplicar catalizador TiO<sub>2</sub> Degussa (P-25) que con la lámpara 395 nm, pasando de 1.164.285,59 mJ/cm<sup>2</sup> a 282.011,16 mJ/cm<sup>2</sup> esto es una reducción de 882.274.43 mJ/cm<sup>2</sup>. Con la lámpara UV-LED 395 nm se consigue una reducción de 597.734,84 mJ/cm<sup>2</sup> sin catalizador a alcanzar 103.173,28 mJ/cm<sup>2</sup> con catalizador, esto es una reducción de 494.561,56 mJ/cm<sup>2</sup>. Por lo tanto para conseguir la misma eliminación bacteriana sin catalizador que con catalizador necesitamos aplicar mucha más cantidad de energía.

## 5. CONCLUSIONES

1. Se ha desarrollado una metodología específica para comparar la eficiencia energética de distintas fuentes de luz UV en la desinfección de aguas basada en el desarrollo de una lámpara LED de longitudes de onda UVA, con acoplamiento de instrumentos de medición y control, y en la actinometría con ferrioxalato potásico.

2. Se ha verificado que el mayor grado de desinfección se logra con la lámpara UV convencional de 254 nm ya que esta longitud de onda se encuentra próxima al pico de absorción del ADN bacteriano (265 nm). Se consigue desinfectar totalmente un agua como la efluente de una EDAR como la de Medinaceli (Soria) en aproximadamente 1,5 minutos de tratamiento.

3. La eliminación de patógenos en aguas contaminadas para su utilización con luz UV empleando tecnología LED alcanza buenos rendimientos de eliminación, los cuales son superiores a los alcanzados empleando tecnología UV de vapor de mercurio en la misma longitud de onda UVA (365-366 nm). La lámpara convencional 366 nm consume 2.259.060,34 mJ/cm<sup>2</sup> para un nivel de inactivación con un valor de 1 log, la lámpara UV-LED 365nm necesita consumir menor cantidad de energía para inactivar un logaritmo 1.310.658,56 mJ/cm<sup>2</sup>.

4. Para aguas cuya concentración de bacterias no sea superior a unas 100 bacterias por ml, la lámpara LED 365 nm es capaz de desinfectar el agua en 60 min hasta alcanzar los límites establecidos por la normativa para el uso agrícola de aguas recuperadas. Concretamente la normativa más restrictiva de riegos cuyos cultivos tengan contacto con el agua establece un valor máximo admisible de E. coli es 1 UFC/ml). Valor que ha sido alcanzado en los ensayos.

5. Cuando se emplea un foto-catalizador de TiO<sub>2</sub> en el agua se consigue mejorar la desinfección empleando lámparas LED que irradian a longitudes de onda UVA más próximas a la luz visible (385 y 395 nm). Para longitudes de onda tan elevadas, la lámpara que mejores resultados ha logrado aplicando 0,02 g de TiO<sub>2</sub> Degussa P-25 ha sido la LED 395 nm a 8 W de potencia en el agua.

6. Es posible minimizar los gastos en desinfección con luz ultravioleta utilizando tecnología LED; incluso se podría pensar en técnicas de desinfección con luz solar aplicando catalizadores, proporcionando así un gran ahorro en desinfección. La lámpara UV convencional de vapor de mercurio consume 1,72 veces más energía que la lámpara UV-LED a la misma potencia para inactivar un logaritmo de inactivación.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

1. Stamps, B.W.; Leddy, M.B., Plumbee, M.H., et al., *Characterization of the Microbiome at the World's Largest Potable Water Reuse Facility*. *Frontiers in Microbiology*, 2018. 9(2435).
2. Vandernoot, L., *The future of water*. Faculty of Economics and business, 2014.
3. Niemczynowicz, J., *Present changes in water management, A need to see connections and interactions*. International water resources association, 2000. 25(1): P. 139-147.
4. Lalzad, P., *An overview of global water problems and solutions*. London, 2007.
5. Pilon, L., Berberoglu, H. and Kandilian, R., *Radiation transfer in photobiological carbon dioxide fixation and fuel production by microalgae*. *Journal of quantitative spectroscopy and radiative transfer*, 2011. 112(17): P. 2639-2660.
6. Onkundi, P., Oin, Y., et al. *Effects of single and combined UV-LEDs on inactivation and subsequent reactivation of E.Coli in water disinfection*. *Water Research*, 2018. 147: P.331-341.
7. Bentancor, M., Vidal, S., *Programable and low-cost ultraviolet room disinfection device*. *HardwareX*, 2018.
8. Den Baars, S.P., Feezell, D., Kelchner, K., Pimputkar, S., Pan, C.C., Yen, C.C., Tanaka, S., Zhao, Y., Pfaff, N., Farrell, R., *Development of gallium-nitride-based light-emitting diodes (LEDs) and laser diodes for energy-efficient lighting and displays*. *Acta Materialia*, 61(3): P.945-951.
9. Che, J., Chu ,C., Tian, K., Kou, J., Shao, H., Zhang, Y., Bi, W., Zhang, Z., *In the p-AlGaN / n-AlGaN / p-AlGaN current distribution layer for AlGaN-based deep-ultraviolet light-emitting diodes*. *Nanocale Research Letters*, 2018. 355(13).
10. Chang, J., Ossoff, S., et all. *UV inactivation of pathogenic irradiation microorganisms*. *Applied and environmental microbiology*, 1985. 49(6): P. 1361-1365.
11. Sastry, SK, Datta, AK, y Worobo, RW (2000). *Ultraviolet light*. *Journal of Food Science*, 65, 90-92. Doi: 10.1111 / j.1750-3841.2000.tb00623.x
12. Millán, D., Romero, L., Brito, Marbella., Ramos-Villarroel, Y. A. (2015, Julio-septiembre 3). Luz ultravioleta: inactivación microbiana en frutas. *Revista Multidisciplinaria del Consejo de Investigación de la Universidad de Oriente*, vol. 27, pp. 454-469.
13. Würtele, M.A., Kolbe, T., Lipsz, M., Külberg, A., Weyers, M., Kneissl, M., Jekel, M., *Application of GaN-based ultraviolet-C light emitting diodes UV LEDs for water disinfection*. *Water research*, 2010. 45(2011): P. 1481-1489.
14. Hatchard, C. G., A. Parker, *A New Sensitive Chemical Actinometer. II. Potassium Ferrioxalate as a Standard Chemical Actinometer*. The Royal Society, 1956. 235(1203): P. 518-536.
15. Montalti, M., Credi, A., Prodi, L., and Gandolfi, M. T., *Handbook of Photochemistry*. Taylor and Francis Group, 2006.

## REDUCCIÓN DE PATÓGENOS EN AGUA DE CONSUMO Y REUTILIZADAS MEDIANTE APLICACIÓN DE LUZ ULTRAVIOLETA DE BAJO CONSUMO

16. Wright, H. B., Cairns, W. L., *Desinfección de agua por medio de luz ultravioleta*. Trojan Technologies Inc, 1999.
17. EMD Millipore Corporation. (2015). Technical Data Sheet Chromocult® coliform Agar acc. ISO 9308-1 (1.10426.0500).
18. Silva, R., Núñez, J., Medina, A., Seña, A., Montiel, M., *Calidad microbiológica del agua de distribución intradomiciliaria en dos zonas rurales del estado Falcón, Venezuela*. Serbiluz Sistema de servicios bibliotecarios y de información, 2015. 5(1y2): P.129-134.
19. Song, K., Mohseni, M., Taghipour, F., *Application of ultraviolet light-emitting diodes (UV-LEDs) for water disinfection: A review*. Water research, 2016.
20. DIFCO Francisco Soria Melguizo, S.A. (2009). Ficha técnica M-FC Agar 60mm (770622).
21. Onkundi, P., Qin, Y., Zhang, B., Lu, Y., Shen, L., *Effects of single and combined UV-LEDs on inactivation and subsequent reactivation of E. coli in water disinfection*. Water Research, 2018. 147: P. 331-341.
22. Verdier, T., Coutand, M., Bertron, A., Roques, C., *Antibacterial Activity of TiO<sub>2</sub> Photocatalyst Alone or in Coatings on E. coli: The Influence of Methodological Aspects*. Coatings, 2014. 4: P. 670-686.
23. Chatterjee, D., Dasgupta, S., *Visible light induced photocatalytic degradation of organic pollutants*. Journal of Photochemistry and Photobiology, 2005. 6: P. 186-205.
24. Lopez, S., Gil, E., Gomez, M., Dobrosz, I., *Foto-Degradación de fenol sobre catalizadores de TiO<sub>2</sub> y Mo/TiO<sub>2</sub>. La metodología de superficie de respuesta como herramienta de optimización*. Información Tecnológica, 2014. 5(25): P. 3-12.
25. Ganguly, P., Byrne, C., Breen, A., Pillai, C. *Antimicrobial Activity of Photocatalysts: Fundamentals, Mechanisms, Kinetics and Recent Advances*. Applied Catalysis B, Environmental, 2017.
26. C.G.Hatchard and C.A. Parker. *A new sensitive chemical actinometer. ii. potassium ferrioxalate as a standard chemical actinometer*. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, 1956. 235: P.518–536.
27. Chromocult Coliform Agar (2014). Simultaneous detection of coliform bacteria and E. coli in Water.
28. Ohno, T., Sarukawa, K., Tokieda, K., and Matsumura, M. *Morphology of a TiO<sub>2</sub> Photocatalyst (Degussa, P-25) Consisting of Anatase and Rutile Crystalline Phases*. Journal of Catalysis, (2001) 203, :P. 82–86.
29. Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación. Encuesta sobre superficies y rendimientos de cultivos, 2018.

## ACRÓNIMOS

LED: *Light-emitting diode*.

UV: Ultravioleta.

UFC: Unidades formadoras de colonias.

EDAR: Estación depuradora de aguas residuales.

ADN: Ácido desoxirribonucleico.

DQO: Demanda química de oxígeno.

TFM: Trabajo fin de master.

EIFAB: Escuela de Ingeniería de la industria Forestal, Agronómica y de la Bioenergía.

CPD: *Cyclobutane pyrimidine dimer*

EQE: *External quantum efficiency*

ROS: *Reactive oxygen species*

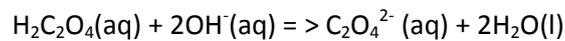
## ANEXOS

### ANEXO I. PREPARACIÓN DE FERROXALATO DE POTASIO

Para realizar las pruebas de actinometría se empleó el actinómetro químico ferrioxalato de potasio

Para producir 36 g de ferrioxalato de potasio se siguen los siguientes pasos:

1. Se añaden 80 ml de agua destilada a un vaso de precipitados que contiene 37,8 g de ácido oxálico.
2. Se agita.
3. Lentamente se añaden 33,6 g de hidróxido de potasio, los iones de hidróxido reaccionan con las moléculas de ácido oxálico formando iones oxalato.



Es una reacción exotérmica por lo tanto genera calor, y no sería necesario calentar la mezcla.

4. Añadimos 27,03 g de cloruro de hierro III hexahidrato. Esto toma un color verde al unirse los iones de hierro con los iones oxalato. El  $\text{Fe}^{3+}$  se reduce a  $\text{Fe}^{2+}$  con la luz.
5. Se deja enfriar para que el ferrioxalato cristalice, mejor en ambiente oscuro para que no reaccione con la luz.
6. Se filtran los cristales obtenidos de ferrioxalato de potasio para eliminar el cloruro de potasio sobrante.
7. Y se lavan los cristales obtenidos de ferrioxalato de potasio para eliminar el cloruro de potasio restante.
8. Los cristales se introducen en la estufa a  $45^\circ\text{C}$  durante un día para que se sequen.

### ANEXO II. PREPARACIÓN DEL ACTINÓMETRO

Para preparar el actinómetro de ferrioxalato de potasio a una concentración 0.006 M, se disuelven 0.2947 g de ferrioxalato de potasio en una disolución acuosa añadiendo 10 ml de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  0,5 M. La disolución actinométrica se enrasa en un matraz de 100 ml con agua destilada [15].

### ANEXO III. CARACTERIZACIÓN DE LA FUENTE DE LUZ ULTRAVIOLETA

Para obtener la curva de calibrado de cada lámpara y longitud de onda, realizamos 3 pruebas para cada longitud de onda.

#### ENSAYO 1 CON LÁMPARA UV CONVENCIONAL 254nm DE LONGITUD DE ONDA

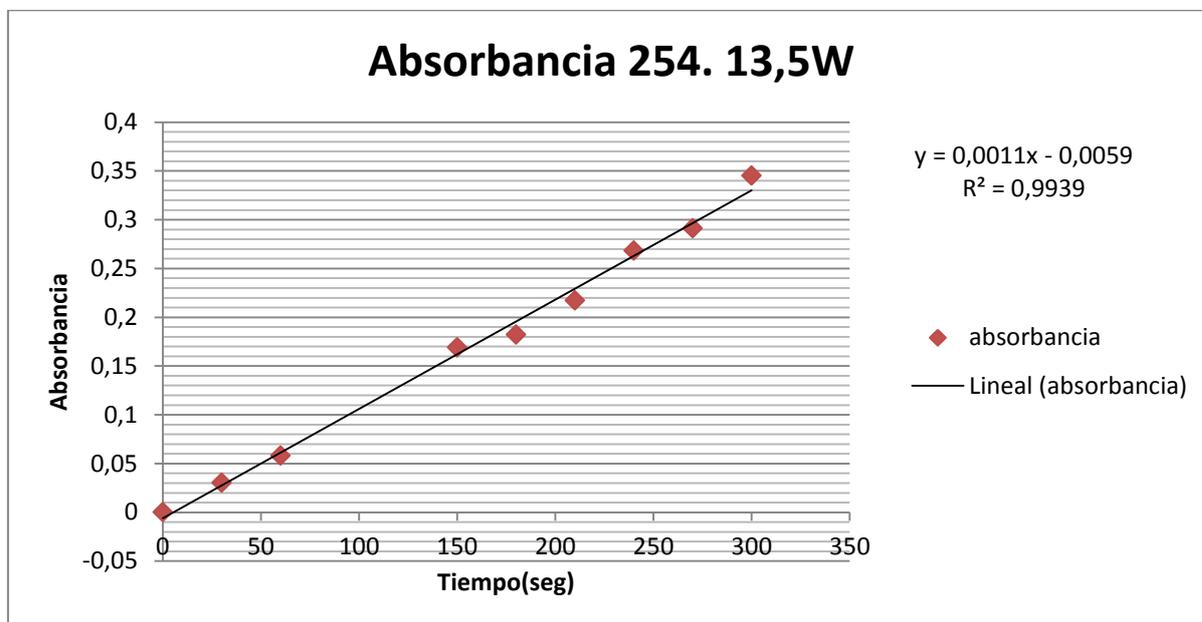


Figura 16. Curva de calibrado para lámpara UV convencional 254nm. 13,5W. Ensayo 1

| Nº | t(s) | Absorbancia 254nm | Magnitud               | Valor      | Unidad                                                          |
|----|------|-------------------|------------------------|------------|-----------------------------------------------------------------|
| 0  | 0    | 0                 | V1                     | 100        | ml                                                              |
| 1  | 30   | 0,03              | V2                     | 1          | ml                                                              |
| 2  | 60   | 0,058             | V3                     | 25         | ml                                                              |
| 3  | 90   |                   | $\Delta A$             | 0,345      |                                                                 |
| 4  | 120  |                   | l                      | 1          | cm                                                              |
| 5  | 150  | 0,169             | $\epsilon$             | 11100      | L/mol cm                                                        |
| 6  | 180  | 0,182             | moles Fe <sup>2+</sup> | 7,7703E-05 | mol                                                             |
| 7  | 210  | 0,217             | $\Phi$                 | 1,25       |                                                                 |
| 8  | 240  | 0,268             | t                      | 300        | s                                                               |
| 9  | 270  | 0,291             | F                      | 1          |                                                                 |
| 10 | 300  | 0,345             | Nhv/t                  | 2,0721E-07 | mol pho/s                                                       |
|    |      |                   | Nhv/t                  | 0,20720721 | micromolPho/s                                                   |
|    |      |                   | r                      | 0,045      | m                                                               |
|    |      |                   | a                      | 0,00636173 | m <sup>2</sup>                                                  |
|    |      |                   | $\pi$                  | 3,14159265 |                                                                 |
|    |      |                   |                        | 32,6       | micromoles Photones/(seg · m <sup>2</sup> )<br>=(microEinstein) |

Tabla 8. Parámetros para el cálculo de potencia de irradiación para lámpara UV convencional 254nm. 13,5W. Ensayo 1

ENSAYO 2 CON LÁMPARA UV CONVENCIONAL 254nm DE LONGITUD DE ONDA

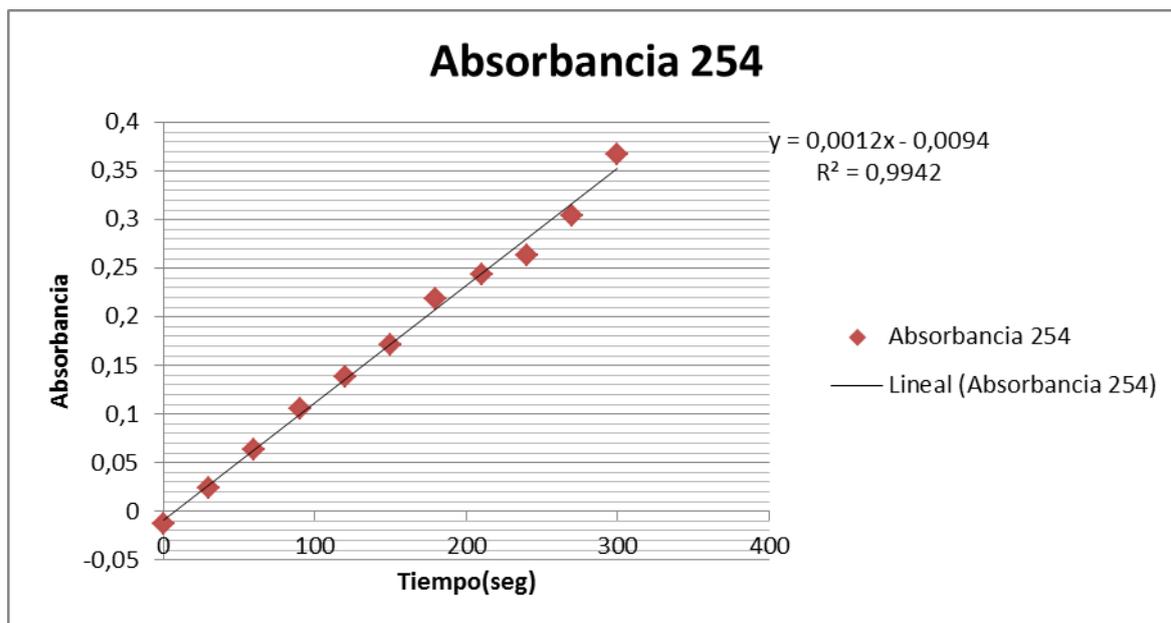


Figura 17. Curva de calibrado para lámpara UV convencional 254nm. 13,5W. Ensayo 2

| Nº | t(s) | Absorbancia 254nm | Magnitud   | Valor      | Unidad                                                             |
|----|------|-------------------|------------|------------|--------------------------------------------------------------------|
| 0  | 0    | -0,013            | V1         | 100        | ml                                                                 |
| 1  | 30   | 0,024             | V2         | 1          | ml                                                                 |
| 2  | 60   | 0,063             | V3         | 25         | ml                                                                 |
| 3  | 90   | 0,105             | $\Delta A$ | 0,38       |                                                                    |
| 4  | 120  | 0,138             | l          | 1          | cm                                                                 |
| 5  | 150  | 0,172             | $\epsilon$ | 11100      | L/mol cm                                                           |
| 6  | 180  | 0,219             | moles Fe2+ | 8,5586E-05 | mol                                                                |
| 7  | 210  | 0,244             | $\Phi$     | 1,25       |                                                                    |
| 8  | 240  | 0,263             | t          | 300        | s                                                                  |
| 9  | 270  | 0,304             | F          | 1          |                                                                    |
| 10 | 300  | 0,367             | Nhv/t      | 2,2823E-07 | mol pho/s                                                          |
|    |      |                   | Nhv/t      | 0,22822823 | micromolPho/s                                                      |
|    |      |                   | r          | 0,045      | m                                                                  |
|    |      |                   | a          | 0,00636173 | m <sup>2</sup>                                                     |
|    |      |                   | $\pi$      | 3,14159265 |                                                                    |
|    |      |                   |            | 35,9       | micromoles<br>Photonos/(seg · m <sup>2</sup> )<br>=(microEinstein) |

Tabla 9. Parámetros para el cálculo de potencia de irradiación para lámpara UV convencional 254nm.

13,5W. Ensayo 2

ENSAYO 3 CON LÁMPARA UV CONVENCIONAL 254nm DE LONGITUD DE ONDA

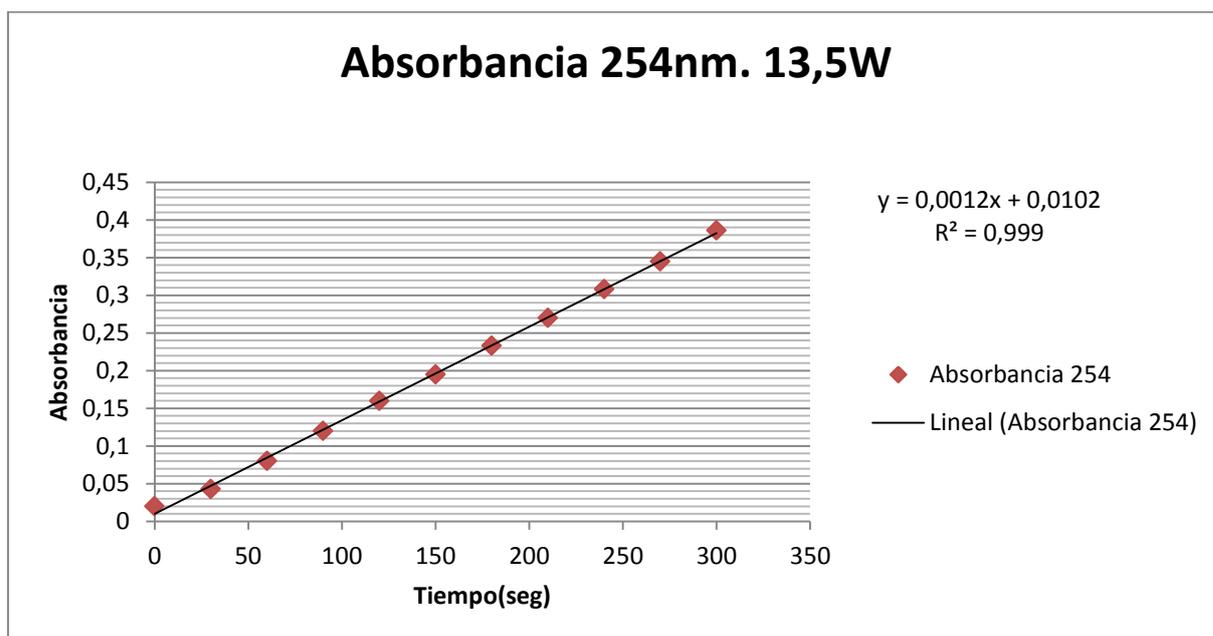


Figura 18. Curva de calibrado para lámpara UV convencional 254nm. 13,5W. Ensayo 3

| Nº | t(s) | Absorbancia 254nm | Magnitud   | Valor      | Unidad                                                              |
|----|------|-------------------|------------|------------|---------------------------------------------------------------------|
| 0  | 0    | 0,02              | V1         | 100        | ml                                                                  |
| 1  | 30   | 0,043             | V2         | 1          | ml                                                                  |
| 2  | 60   | 0,08              | V3         | 25         | ml                                                                  |
| 3  | 90   | 0,12              | $\Delta A$ | 0,366      |                                                                     |
| 4  | 120  | 0,16              | l          | 1          | cm                                                                  |
| 5  | 150  | 0,195             | $\epsilon$ | 11100      | L/mol cm                                                            |
| 6  | 180  | 0,233             | moles Fe2+ | 8,2432E-05 | mol                                                                 |
| 7  | 210  | 0,27              | $\Phi$     | 1,25       |                                                                     |
| 8  | 240  | 0,308             | t          | 300        | s                                                                   |
| 9  | 270  | 0,345             | F          | 1          |                                                                     |
| 10 | 300  | 0,386             | Nhv/t      | 2,1982E-07 | mol pho/s                                                           |
|    |      |                   | Nhv/t      | 0,21981982 | micromolPho/s                                                       |
|    |      |                   | r          | 0,045      | m                                                                   |
|    |      |                   | a          | 0,00636173 | m <sup>2</sup>                                                      |
|    |      |                   | $\pi$      | 3,14159265 |                                                                     |
|    |      |                   |            | 34,55      | micromoles<br>Photoness/(seg · m <sup>2</sup> )<br>=(microEinstein) |

Tabla 10. Parámetros para el cálculo de potencia de irradiación para lámpara UV convencional 254nm. 13,5W. Ensayo 3

ENSAYO 1 CON LÁMPARA UV CONVENCIONAL 366nm DE LONGITUD DE ONDA

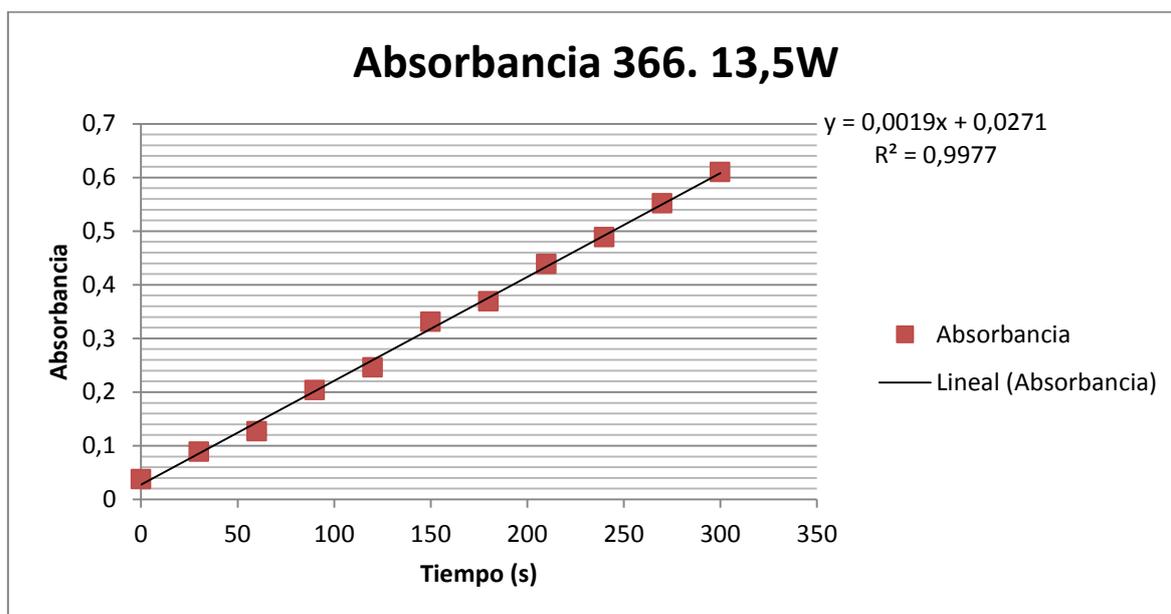


Figura 19. Curva de calibrado para lámpara UV convencional 366nm. 13,5W. Ensayo 1

| Nº | t(s) | Absorbancia 366nm | Magnitud   | Valor       | Unidad                                 |
|----|------|-------------------|------------|-------------|----------------------------------------|
| 0  | 0    | 0,038             | V1         | 100         | ml                                     |
| 1  | 30   | 0,089             | V2         | 1           | ml                                     |
| 2  | 60   | 0,127             | V3         | 25          | ml                                     |
| 3  | 90   | 0,204             | $\Delta A$ | 0,572       |                                        |
| 4  | 120  | 0,246             | l          | 1           | cm                                     |
| 5  | 150  | 0,331             | $\epsilon$ | 11100       | L/mol cm                               |
| 6  | 180  | 0,369             | moles Fe2+ | 0,000128829 | mol                                    |
| 7  | 210  | 0,439             | $\Phi$     | 1,21        |                                        |
| 8  | 240  | 0,489             | t          | 300         | s                                      |
| 9  | 270  | 0,552             | F          | 1           |                                        |
| 10 | 300  | 0,61              | Nhv/t      | 3,549E-07   | mol pho/s                              |
|    |      |                   | Nhv/t      | 0,354900355 | micromolPho/s                          |
|    |      |                   | r          | 0,045       | m                                      |
|    |      |                   | a          | 0,006361725 | m <sup>2</sup>                         |
|    |      |                   | $\pi$      | 3,141592654 |                                        |
|    |      |                   |            | 55,8        | micromoles Photones/seg m <sup>2</sup> |
|    |      |                   |            |             | =(microEinstein)                       |

Tabla 11. Parámetros para el cálculo de potencia de irradiación para lámpara UV convencional 366nm. 13,5W. Ensayo 1

ENSAYO 2 CON LÁMPARA UV CONVENCIONAL 366nm DE LONGITUD DE ONDA

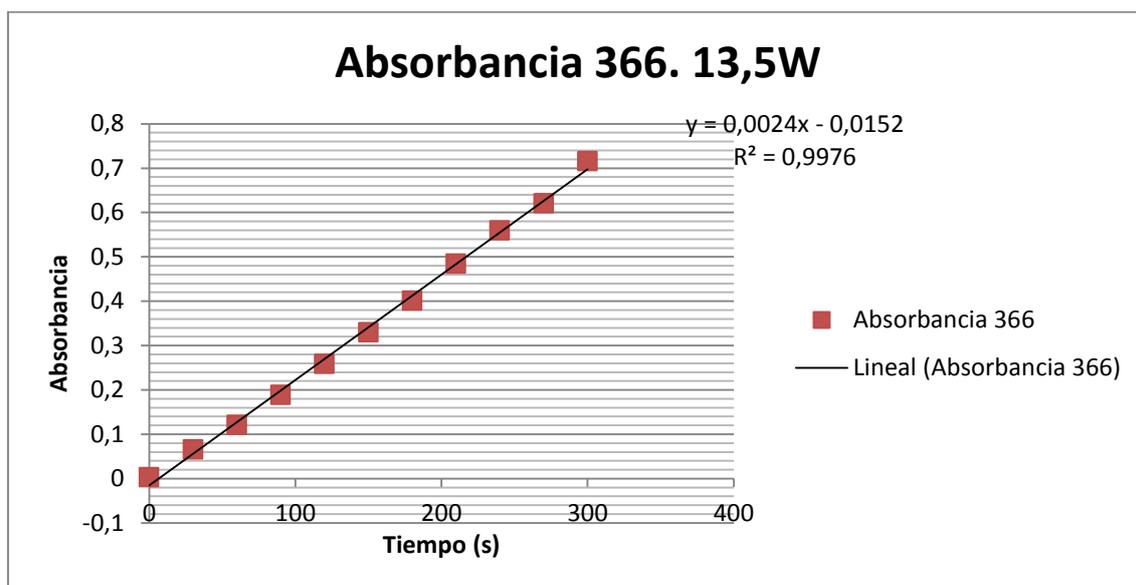


Figura 20. Curva de calibrado para lámpara UV convencional 366nm. 13,5W. Ensayo 2

| Nº | t(s) | Absorbancia 366nm | Magnitud               | Valor       | Unidad                                                        |
|----|------|-------------------|------------------------|-------------|---------------------------------------------------------------|
| 0  | 0    | 0,003             | V1                     | 100         | ml                                                            |
| 1  | 30   | 0,066             | V2                     | 1           | ml                                                            |
| 2  | 60   | 0,121             | V3                     | 25          | ml                                                            |
| 3  | 90   | 0,189             | $\Delta A$             | 0,713       |                                                               |
| 4  | 120  | 0,259             | l                      | 1           | cm                                                            |
| 5  | 150  | 0,33              | $\epsilon$             | 11100       | L/mol cm                                                      |
| 6  | 180  | 0,401             | moles Fe <sup>2+</sup> | 0,000160586 | mol                                                           |
| 7  | 210  | 0,485             | $\Phi$                 | 1,21        |                                                               |
| 8  | 240  | 0,56              | t                      | 300         | s                                                             |
| 9  | 270  | 0,621             | F                      | 1           |                                                               |
| 10 | 300  | 0,716             | Nhv/t                  | 4,42385E-07 | mol pho/s                                                     |
|    |      |                   | Nhv/t                  | 0,442384533 | micromolPho/s                                                 |
|    |      |                   | r                      | 0,045       | m                                                             |
|    |      |                   | a                      | 0,006361725 | m <sup>2</sup>                                                |
|    |      |                   | $\pi$                  | 3,141592654 |                                                               |
|    |      |                   |                        | 69,5        | micromoles<br>Photones/seg m <sup>2</sup><br>=(microEinstein) |

Tabla 12. Parámetros para el cálculo de potencia de irradiación para lámpara UV convencional 366nm. 13,5W. Ensayo 2

ENSAYO 3 CON LÁMPARA UV CONVENCIONAL 366nm DE LONGITUD DE ONDA

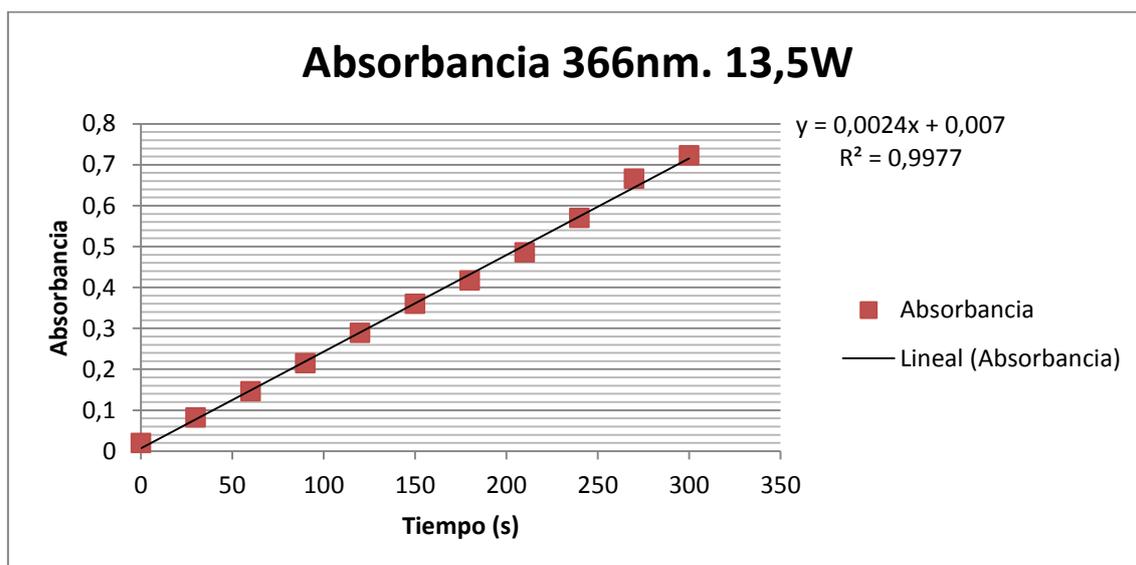


Figura 21. Curva de calibrado para lámpara UV convencional 366nm. 13,5W. Ensayo 3

| Nº | t(s) | Absorbancia 366nm | Magnitud               | Valor       | Unidad                                                         |
|----|------|-------------------|------------------------|-------------|----------------------------------------------------------------|
| 0  | 0    | 0,02              | V1                     | 100         | ml                                                             |
| 1  | 30   | 0,082             | V2                     | 1           | ml                                                             |
| 2  | 60   | 0,146             | V3                     | 25          | ml                                                             |
| 3  | 90   | 0,215             | $\Delta A$             | 0,703       |                                                                |
| 4  | 120  | 0,289             | l                      | 1           | cm                                                             |
| 5  | 150  | 0,36              | $\epsilon$             | 11100       | L/mol cm                                                       |
| 6  | 180  | 0,417             | moles Fe <sup>2+</sup> | 0,000158333 | mol                                                            |
| 7  | 210  | 0,486             | $\Phi$                 | 1,21        |                                                                |
| 8  | 240  | 0,57              | t                      | 300         | s                                                              |
| 9  | 270  | 0,666             | F                      | 1           |                                                                |
| 10 | 300  | 0,723             | Nhv/t                  | 4,3618E-07  | mol pho/s                                                      |
|    |      |                   | Nhv/t                  | 0,436179982 | micromolPho/s                                                  |
|    |      |                   | r                      | 0,045       | m                                                              |
|    |      |                   | a                      | 0,006361725 | m <sup>2</sup>                                                 |
|    |      |                   | $\pi$                  | 3,141592654 |                                                                |
|    |      |                   |                        | 68,6        | micromoles<br>Photoness/seg m <sup>2</sup><br>=(microEinstein) |

Tabla 13. Parámetros para el cálculo de potencia de irradiación para lámpara UV convencional 366nm. 13,5W. Ensayo 3

ENSAYO 1 CON LÁMPARA UV LED 365nm, POTENCIA= 8W

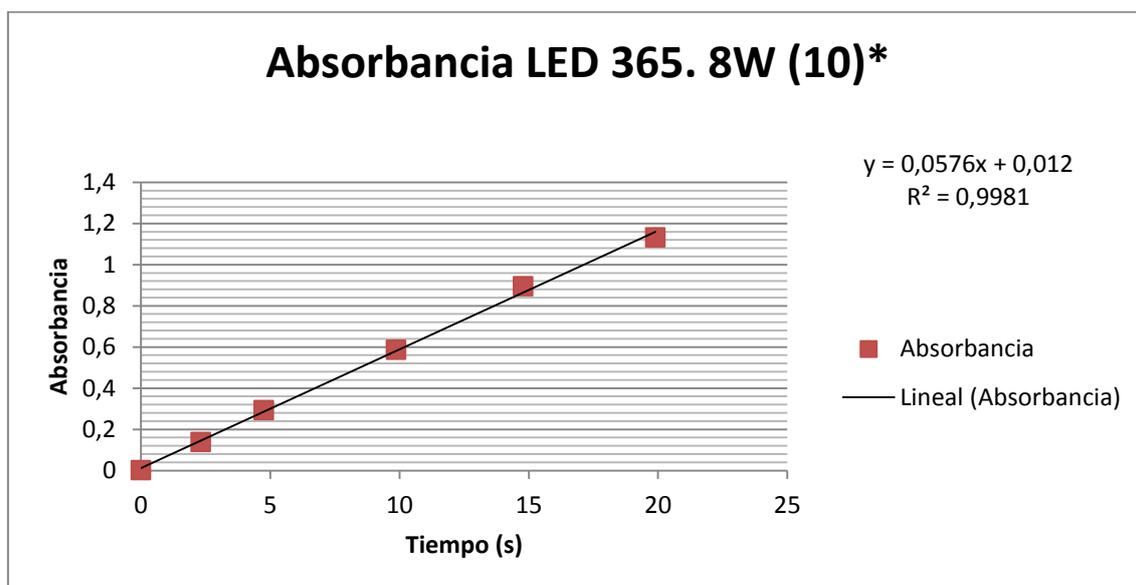


Figura 22. Curva de calibrado para lámpara UV-LED 365nm. 8W. Ensayo 1.\*10 LEDs

La saturación del actinómetro se alcanza a los 19,90 segundos de exposición.

| Nº | t(s)  | Absorbancia 365nm | Magnitud               | Valor       | Unidad                                                  |
|----|-------|-------------------|------------------------|-------------|---------------------------------------------------------|
| 0  | 0     | 0,002             | V1                     | 100         | ml                                                      |
| 1  | 2,31  | 0,138             | V2                     | 1           | ml                                                      |
| 2  | 4,75  | 0,293             | V3                     | 25          | ml                                                      |
| 3  | 9,87  | 0,586             | $\Delta A$             | 1,13        |                                                         |
| 4  | 14,79 | 0,895             | I                      | 1           | cm                                                      |
| 5  | 19,90 | 1,132             | $\epsilon$             | 11100       | L/mol cm                                                |
| 6  | 25,02 | 1,237             | moles Fe <sup>2+</sup> | 0,000254505 | mol                                                     |
| 7  | 30,54 | 1,247             | $\Phi$                 | 1,21        |                                                         |
| 8  | 35,41 | 1,301             | t                      | 19,9        | s                                                       |
| 9  | 40,72 | 1,25              | F                      | 1           |                                                         |
| 10 | 45,70 | 1,3               | Nhv/t                  | 1,05696E-05 | mol pho/s                                               |
|    |       |                   | Nhv/t                  | 10,56956288 | micromolPho/s                                           |
|    |       |                   | r                      | 0,045       | m                                                       |
|    |       |                   | a                      | 0,006361725 | m <sup>2</sup>                                          |
|    |       |                   | $\pi$                  | 3,141592654 |                                                         |
|    |       |                   |                        | 1661,4      | micromoles Photones/seg m <sup>2</sup> =(microEinstein) |

Tabla 14. Parámetros para el cálculo de potencia de irradiación para lámpara UV-LED 365nm. 8W.

Ensayo 1.\*10 LEDs

ENSAYO 2 CON LÁMPARA UV LED 365nm, POTENCIA= 8W

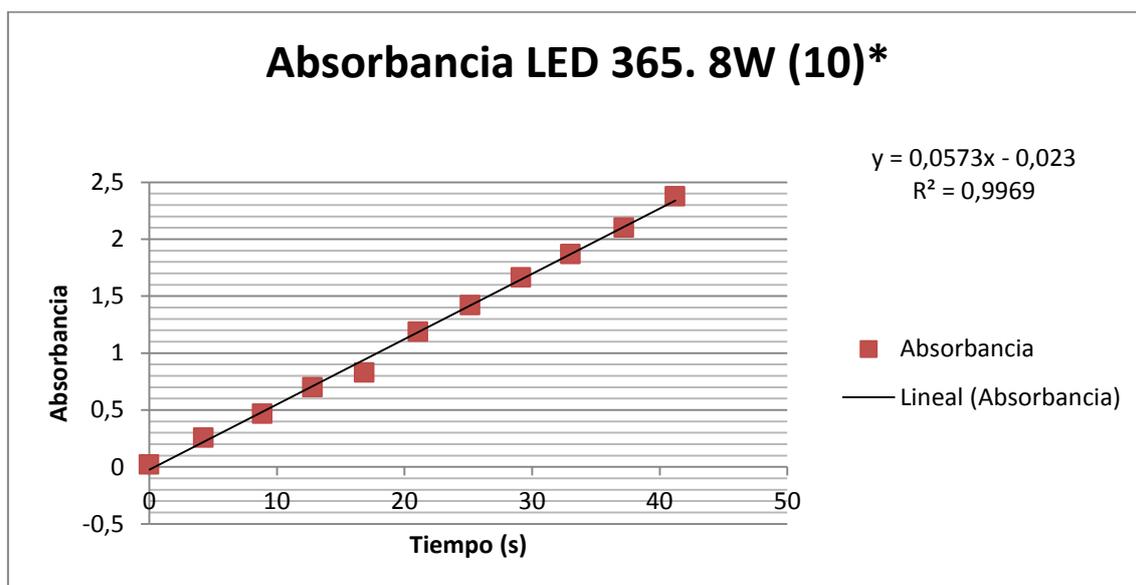


Figura 23. Curva de calibrado para lámpara UV-LED 365nm. 8W. Ensayo 2.\*10 LEDs

| Nº | t(s)  | Absorbancia 365nm | Magnitud               | Valor       | Unidad                                 |
|----|-------|-------------------|------------------------|-------------|----------------------------------------|
| 0  | 0     | 0,023             | V1                     | 100         | ml                                     |
| 1  | 4,25  | 0,259             | V2                     | 1           | ml                                     |
| 2  | 8,85  | 0,467             | V3                     | 25          | ml                                     |
| 3  | 12,80 | 0,700             | $\Delta A$             | 2,355       |                                        |
| 4  | 16,86 | 0,83              | l                      | 1           | cm                                     |
| 5  | 21,07 | 1,188             | $\epsilon$             | 11100       | L/mol cm                               |
| 6  | 25,14 | 1,421             | moles Fe <sup>2+</sup> | 0,000530405 | mol                                    |
| 7  | 29,14 | 1,666             | $\Phi$                 | 1,21        |                                        |
| 8  | 33,01 | 1,87              | t                      | 41,21       | s                                      |
| 9  | 37,21 | 2,103             | F                      | 1           |                                        |
| 10 | 41,21 | 2,378             | Nhv/t                  | 1,0637E-05  | mol pho/s                              |
|    |       |                   | Nhv/t                  | 10,63701953 | micromolPho/s                          |
|    |       |                   | r                      | 0,045       | m                                      |
|    |       |                   | a                      | 0,006361725 | m <sup>2</sup>                         |
|    |       |                   | $\pi$                  | 3,141592654 |                                        |
|    |       |                   |                        | 1672,0      | micromoles Photones/seg m <sup>2</sup> |
|    |       |                   |                        |             | =(microEinstein)                       |

Tabla 15. Parámetros para el cálculo de potencia de irradiación para lámpara UV-LED 365nm. 8W.

Ensayo 2.\*10 LEDs

ENSAYO 3 CON LÁMPARA UV LED 365nm, POTENCIA= 8W

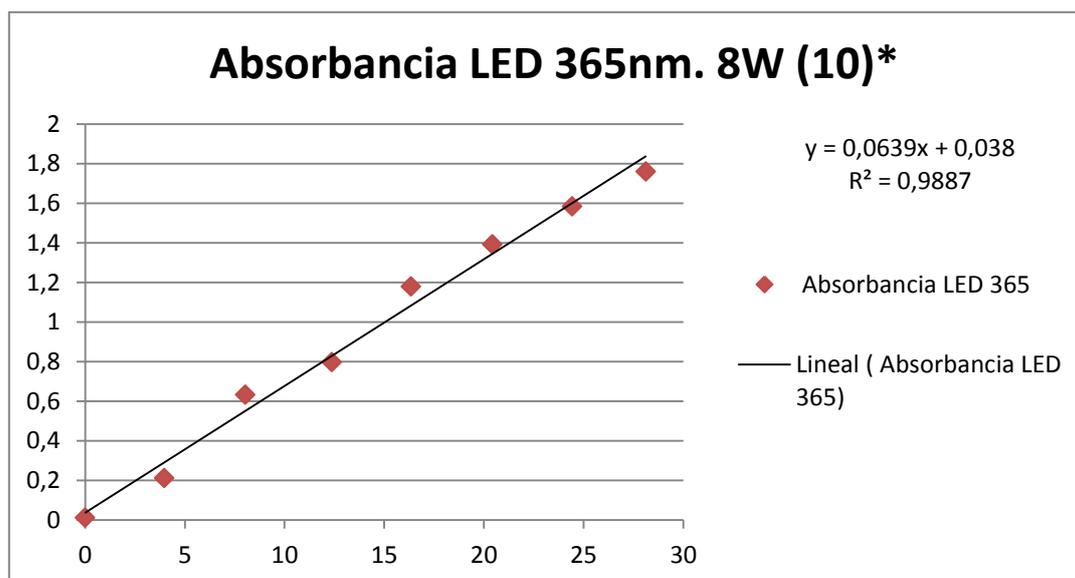


Figura 24. Curva de calibrado para lámpara UV-LED 365nm. 8W. Ensayo 3.\*10 LEDs

| Nº | t(s)  | Absorbancia a 365nm | Magnitud   | Valor      | Unidad                                                        |
|----|-------|---------------------|------------|------------|---------------------------------------------------------------|
| 0  | 0     | 0,013               | V1         | 100        | ml                                                            |
| 1  | 3,97  | 0,213               | V2         | 1          | ml                                                            |
| 2  | 8,03  | 0,633               | V3         | 25         | ml                                                            |
| 3  | 12,37 | 0,798               | ΔA         | 1,747      |                                                               |
| 4  | 16,34 | 1,180               | l          | 1          | cm                                                            |
| 5  | 20,43 | 1,392               | ε          | 11100      | L/mol cm                                                      |
| 6  | 24,43 | 1,584               | moles Fe2+ | 0,00039347 | mol                                                           |
| 7  | 28,12 | 1,760               | Φ          | 1,21       |                                                               |
| 8  | 32,80 | 1,827               | t          | 28,12      | s                                                             |
| 9  |       |                     | F          | 1          |                                                               |
| 10 |       |                     | Nhv/t      | 1,1564E-05 | mol pho/s                                                     |
|    |       |                     | Nhv/t      | 11,564031  | micromolPho/s                                                 |
|    |       |                     | r          | 0,045      | m                                                             |
|    |       |                     | a          | 0,00636173 | m <sup>2</sup>                                                |
|    |       |                     | π          | 3,14159265 |                                                               |
|    |       |                     |            | 1817,8     | micromoles<br>Photones/seg m <sup>2</sup><br>=(microEinstein) |

Tabla 16. Parámetros para el cálculo de potencia de irradiación para lámpara UV-LED 365nm. 8W.

Ensayo 3.\*10 LEDs

ENSAYO 1 CON LÁMPARA UV LED 365 nm, POTENCIA = 13.5W

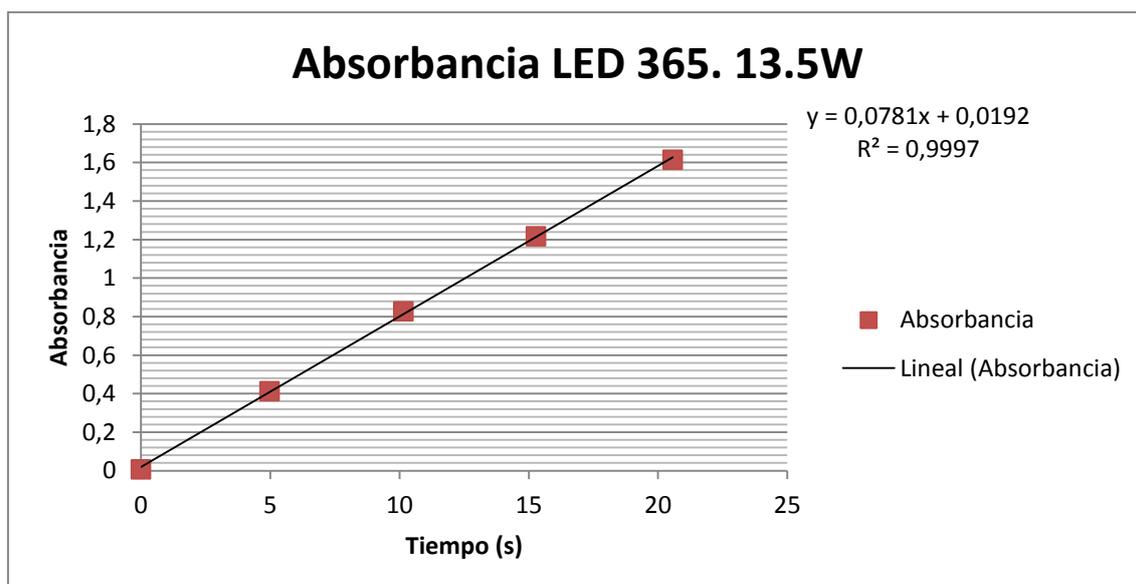


Figura 25. Curva de calibrado para lámpara UV-LED 365nm. 13,5W. Ensayo 1

| Nº | t(s)  | Absorbancia LED 365 nm | Magnitud               | Valor       | Unidad                                                        |
|----|-------|------------------------|------------------------|-------------|---------------------------------------------------------------|
| 0  | 0     | 0,007                  | V1                     | 100         | ml                                                            |
| 1  | 4,98  | 0,413                  | V2                     | 1           | ml                                                            |
| 2  | 10,16 | 0,828                  | V3                     | 25          | ml                                                            |
| 3  | 15,28 | 1,217                  | $\Delta A$             | 1,608       |                                                               |
| 4  | 20,57 | 1,615                  | l                      | 1           | cm                                                            |
| 5  | 25,75 | 1,907                  | $\epsilon$             | 11100       | L/mol cm                                                      |
| 6  | 30,94 | 1,931                  | moles Fe <sup>2+</sup> | 0,000362162 | mol                                                           |
| 7  | 36,12 | 1,868                  | $\Phi$                 | 1,21        |                                                               |
| 8  | 41,43 |                        | t                      | 20,57       | s                                                             |
| 9  | 46,48 |                        | F                      | 1           |                                                               |
| 10 | 51,47 |                        | Nhv/t                  | 1,45507E-05 | mol pho/s                                                     |
|    |       |                        | Nhv/t                  | 14,5506841  | micromolPho/s                                                 |
|    |       |                        | r                      | 0,045       | m                                                             |
|    |       |                        | a                      | 0,006361725 | m <sup>2</sup>                                                |
|    |       |                        | $\pi$                  | 3,141592654 |                                                               |
|    |       |                        |                        | 2287,2      | micromoles<br>Photones/seg m <sup>2</sup><br>=(microEinstein) |

Tabla 17. Parámetros para el cálculo de potencia de irradiación para lámpara UV-LED 365nm. 13,5W. Ensayo 1

ENSAYO 2 CON LÁMPARA UV LED 365 nm, POTENCIA = 13.5W

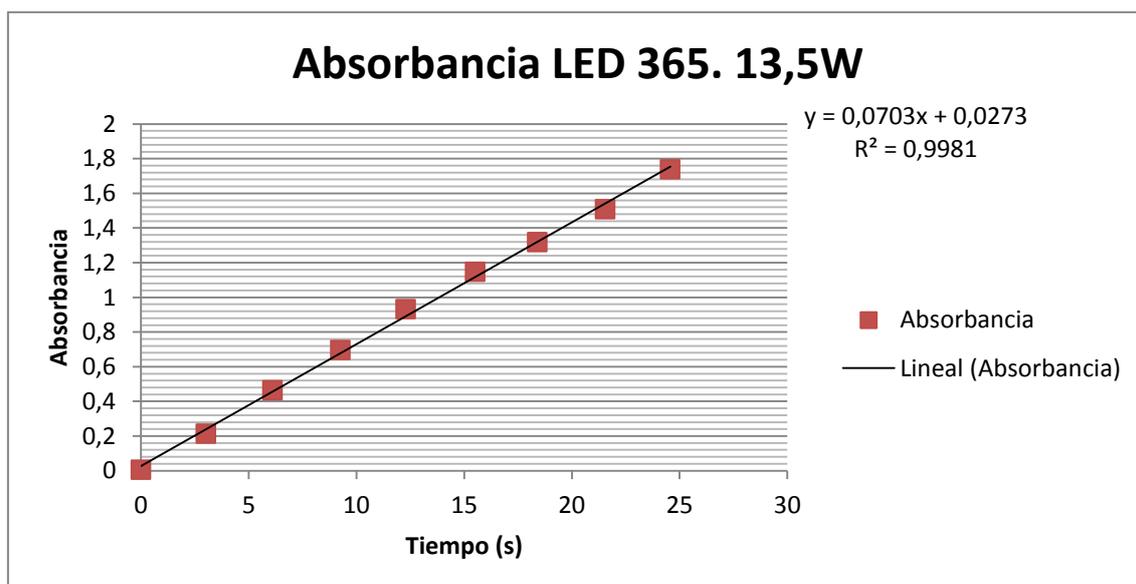


Figura 26. Curva de calibrado para lámpara UV-LED 365nm. 13,5W. Ensayo 2

| Nº | t(s)  | Absorbancia LED 365 nm | Magnitud               | Valor       | Unidad                                                  |
|----|-------|------------------------|------------------------|-------------|---------------------------------------------------------|
| 0  | 0     | 0,005                  | V1                     | 100         | ml                                                      |
| 1  | 3,02  | 0,214                  | V2                     | 1           | ml                                                      |
| 2  | 6,11  | 0,464                  | V3                     | 25          | ml                                                      |
| 3  | 9,26  | 0,697                  | $\Delta A$             | 1,733       |                                                         |
| 4  | 12,29 | 0,932                  | l                      | 1           | cm                                                      |
| 5  | 15,51 | 1,147                  | $\epsilon$             | 11100       | L/mol cm                                                |
| 6  | 18,40 | 1,319                  | moles Fe <sup>2+</sup> | 0,000390315 | mol                                                     |
| 7  | 21,55 | 1,509                  | $\Phi$                 | 1,21        |                                                         |
| 8  | 24,57 | 1,738                  | t                      | 24,57       | s                                                       |
| 9  | 27,67 | 1,909                  | F                      | 1           |                                                         |
| 10 | 30,76 | 1,92                   | Nhv/t                  | 1,31288E-05 | mol pho/s                                               |
|    |       |                        | Nhv/t                  | 13,12880101 | micromolPho/s                                           |
|    |       |                        | r                      | 0,045       | m                                                       |
|    |       |                        | a                      | 0,006361725 | m <sup>2</sup>                                          |
|    |       |                        | $\pi$                  | 3,141592654 |                                                         |
|    |       |                        |                        | 2063,7      | micromoles Photones/seg m <sup>2</sup> =(microEinstein) |

Tabla 18. Parámetros para el cálculo de potencia de irradiación para lámpara UV-LED 365nm. 13,5W.

Ensayo 2

ENSAYO 3 CON LÁMPARA UV LED 365 nm, POTENCIA = 13.5W

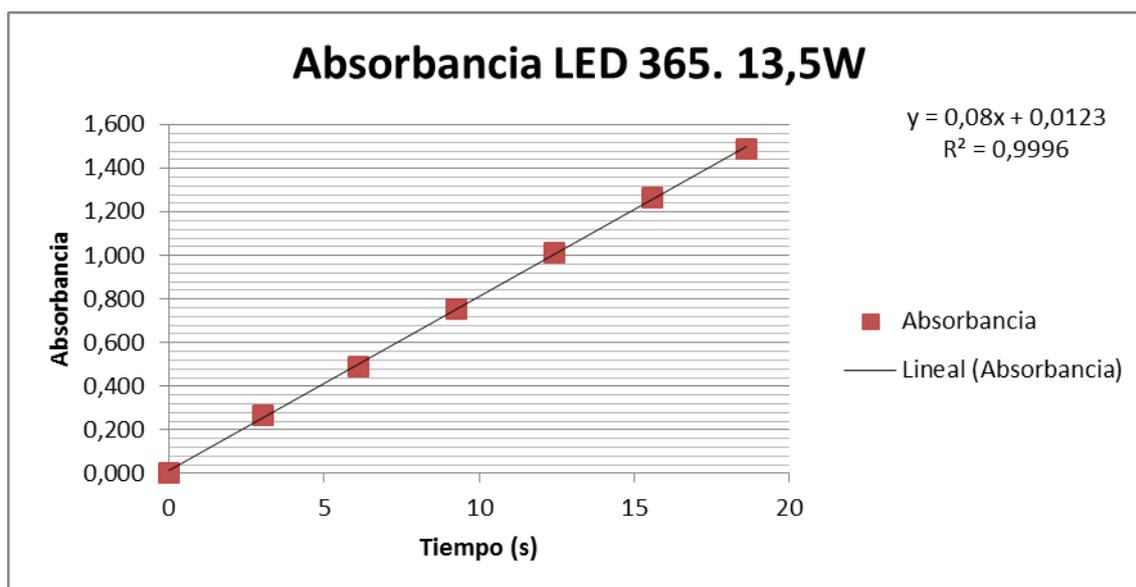


Figura 27. Curva de calibrado para lámpara UV-LED 365nm. 13,5W. Ensayo 3

| Nº | t(s)  | Absorbancia LED 365 nm | Magnitud               | Valor       | Unidad                                                        |
|----|-------|------------------------|------------------------|-------------|---------------------------------------------------------------|
| 0  | 0     | 0,003                  | V1                     | 100         | ml                                                            |
| 1  | 3,02  | 0,267                  | V2                     | 1           | ml                                                            |
| 2  | 6,12  | 0,491                  | V3                     | 25          | ml                                                            |
| 3  | 9,28  | 0,757                  | $\Delta A$             | 1,486       |                                                               |
| 4  | 12,43 | 1,014                  | l                      | 1           | cm                                                            |
| 5  | 15,59 | 1,267                  | $\epsilon$             | 11100       | L/mol cm                                                      |
| 6  | 18,62 | 1,489                  | moles Fe <sup>2+</sup> | 0,000334685 | mol                                                           |
| 7  | 21,70 | 1,642                  | $\Phi$                 | 1,21        |                                                               |
| 8  | 24,87 | 1,905                  | t                      | 18,62       | s                                                             |
| 9  | 27,93 | 1,848                  | F                      | 1           |                                                               |
| 10 | 31,02 | 1,903                  | Nhv/t                  | 1,48549E-05 | mol pho/s                                                     |
|    |       |                        | Nhv/t                  | 14,85493625 | micromolPho/s                                                 |
|    |       |                        | r                      | 0,045       | m                                                             |
|    |       |                        | a                      | 0,006361725 | m <sup>2</sup>                                                |
|    |       |                        | $\pi$                  | 3,141592654 |                                                               |
|    |       |                        |                        | 2335,0      | micromoles<br>Photones/seg m <sup>2</sup><br>=(microEinstein) |

Tabla 19. Parámetros para el cálculo de potencia de irradiación para lámpara UV-LED 365nm. 13,5W.

Ensayo 3

ENSAYO 1 CON LÁMPARA LED visible, POTENCIA = 29,25W

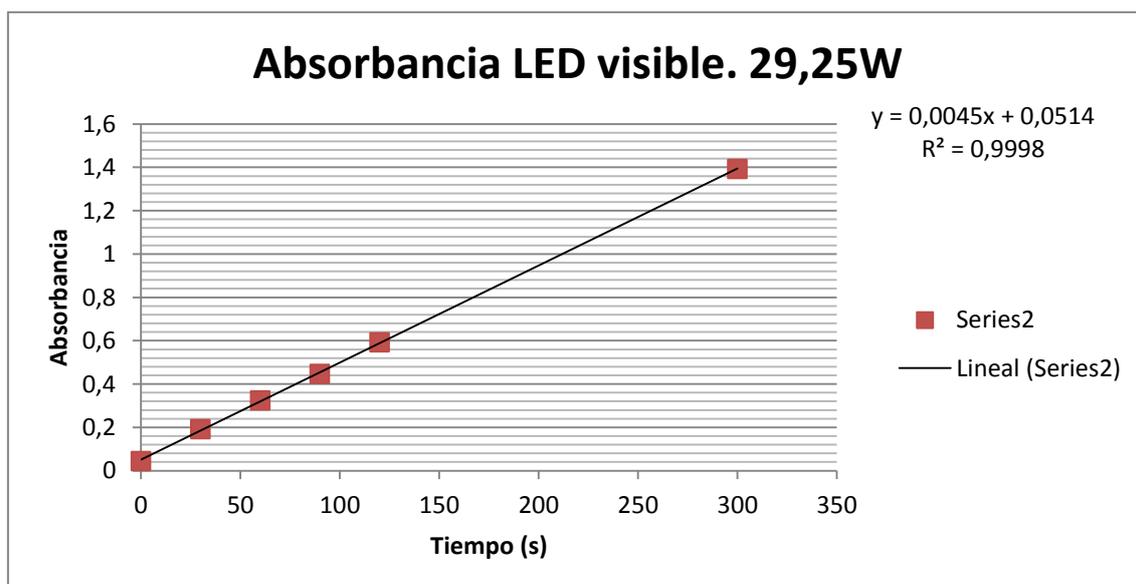


Figura 28. Curva de calibrado para lámpara LED visible. 29,25W

| Nº | t(s) | Absorbancia LED 400-700 nm | Magnitud               | Valor       | Unidad                                                      |
|----|------|----------------------------|------------------------|-------------|-------------------------------------------------------------|
| 0  | 0    | 0,044                      | V1                     | 100         | ml                                                          |
| 1  | 30   | 0,192                      | V2                     | 1           | ml                                                          |
| 2  | 60   | 0,325                      | V3                     | 25          | ml                                                          |
| 3  | 90   | 0,447                      | $\Delta A$             | 1,349       |                                                             |
| 4  | 120  | 0,593                      | l                      | 1           | cm                                                          |
| 5  | 300  | 1,393                      | $\epsilon$             | 11100       | L/mol cm                                                    |
| 6  | 630  | 1,827                      | moles Fe <sup>2+</sup> | 0,00030383  | mol                                                         |
| 7  |      |                            | $\Phi$                 | 128,9       |                                                             |
| 8  |      |                            | t                      | 300,00      | s                                                           |
| 9  |      |                            | F                      | 1           |                                                             |
| 10 |      |                            | Nhv/t                  | 0,000130545 | mol pho/s                                                   |
|    |      |                            | Nhv/t                  | 130,5451201 | micromolPho/s                                               |
|    |      |                            | r                      | 0,045       | m                                                           |
|    |      |                            | a                      | 0,00636173  | m <sup>2</sup>                                              |
|    |      |                            | $\pi$                  | 3,14159265  |                                                             |
|    |      |                            |                        | 20520,4     | micromoles<br>Photones/seg m <sup>2</sup><br>=microEinstein |

Tabla 20. Parámetros para el cálculo de potencia de irradiación para lámpara LED visible. 29,25W

REDUCCIÓN DE PATÓGENOS EN AGUA DE CONSUMO Y REUTILIZADAS MEDIANTE APLICACIÓN DE LUZ ULTRAVIOLETA DE BAJO CONSUMO

ENSAYO 1 CON LÁMPARA LED 365nm, POTENCIA = 3,75W

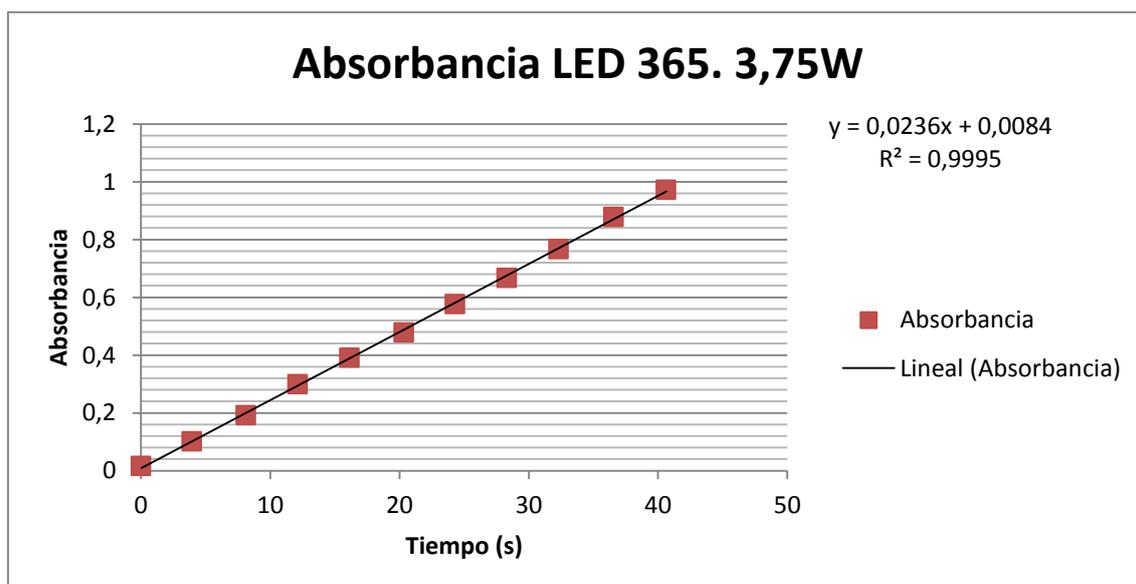


Figura 29. Curva de calibrado para lámpara UV-LED 365nm. 3,75W. Ensayo 1

| Nº | t(s)  | Absorbancia LED 365nm | Magnitud               | Valor      | Unidad                                                   |
|----|-------|-----------------------|------------------------|------------|----------------------------------------------------------|
| 0  | 0     | 0,017                 | V1                     | 100        | ml                                                       |
| 1  | 3,93  | 0,102                 | V2                     | 1          | ml                                                       |
| 2  | 8,12  | 0,192                 | V3                     | 25         | ml                                                       |
| 3  | 12,12 | 0,300                 | $\Delta A$             | 0,956      |                                                          |
| 4  | 16,13 | 0,391                 | I                      | 1          | cm                                                       |
| 5  | 20,34 | 0,479                 | $\epsilon$             | 11100      | L/mol cm                                                 |
| 6  | 24,29 | 0,577                 | moles Fe <sup>2+</sup> | 0,00021532 | mol                                                      |
| 7  | 28,29 | 0,668                 | $\Phi$                 | 1,21       |                                                          |
| 8  | 32,30 | 0,767                 | t                      | 40,63      | s                                                        |
| 9  | 36,56 | 0,879                 | F                      | 1          |                                                          |
| 10 | 40,63 | 0,973                 | Nhv/t                  | 4,3797E-06 | mol phots/s                                              |
|    |       |                       | Nhv/t                  | 4,37968352 | micromolPho/s                                            |
|    |       |                       | r                      | 0,045      | m                                                        |
|    |       |                       | a                      | 0,00636173 | m <sup>2</sup>                                           |
|    |       |                       | $\pi$                  | 3,14159265 |                                                          |
|    |       |                       |                        | 688,4      | micromoles Photones/seg m <sup>2</sup><br>=microEinstein |

Tabla 21. Parámetros para el cálculo de potencia de irradiación para lámpara UV-LED 365nm. 3,75W.

Ensayo 1

ENSAYO 1 CON LÁMPARA LED 385nm, POTENCIA = 3,75W

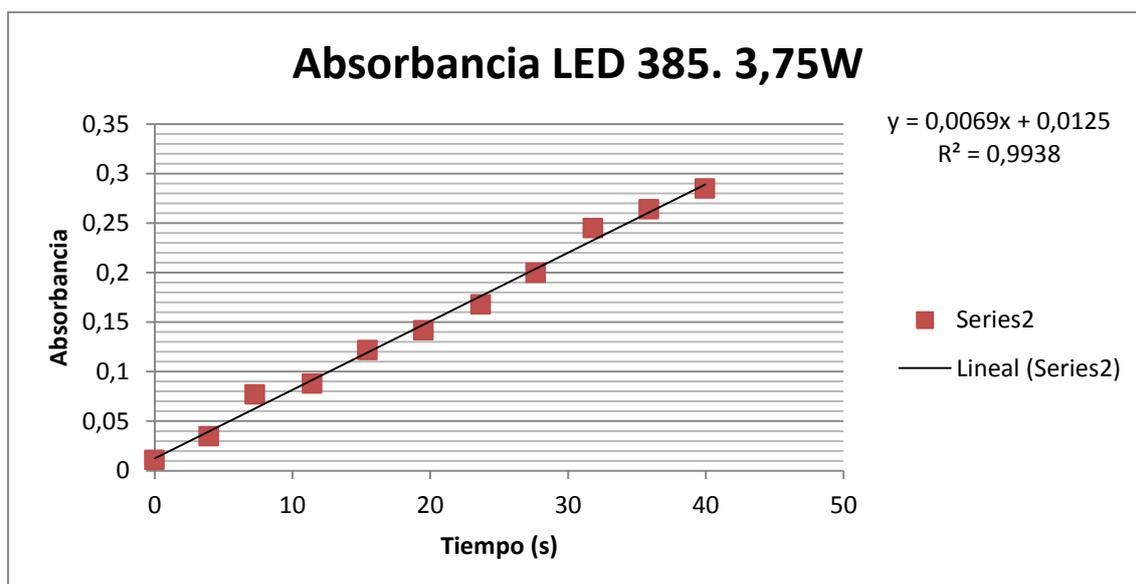


Figura 30. Curva de calibrado para lámpara UV-LED 385nm. 3,75W. Ensayo 1

| Nº | t(s)  | Absorbancia LED 385nm | Magnitud               | Valor      | Unidad                                                      |
|----|-------|-----------------------|------------------------|------------|-------------------------------------------------------------|
| 0  | 0     | 0,011                 | V1                     | 100        | ml                                                          |
| 1  | 3,93  | 0,035                 | V2                     | 1          | ml                                                          |
| 2  | 7,29  | 0,077                 | V3                     | 25         | ml                                                          |
| 3  | 11,43 | 0,088                 | $\Delta A$             | 0,274      |                                                             |
| 4  | 15,44 | 0,122                 | I                      | 1          | cm                                                          |
| 5  | 19,52 | 0,142                 | $\epsilon$             | 11100      | L/mol cm                                                    |
| 6  | 23,66 | 0,168                 | moles Fe <sup>2+</sup> | 6,1712E-05 | mol                                                         |
| 7  | 27,67 | 0,2                   | $\Phi$                 | 1,13       |                                                             |
| 8  | 31,81 | 0,245                 | t                      | 39,94      | s                                                           |
| 9  | 35,88 | 0,264                 | F                      | 1          |                                                             |
| 10 | 39,94 | 0,285                 | Nhv/t                  | 1,3674E-06 | mol phots/s                                                 |
|    |       |                       | Nhv/t                  | 1,36735439 | Micromol Pho/s                                              |
|    |       |                       | r                      | 0,045      | m                                                           |
|    |       |                       | a                      | 0,00636173 | m <sup>2</sup>                                              |
|    |       |                       | $\pi$                  | 3,14159265 |                                                             |
|    |       |                       |                        | 214,9      | micromoles<br>Photones/seg m <sup>2</sup><br>=microEinstein |

Tabla 22. Parámetros para el cálculo de potencia de irradiación para lámpara UV-LED 385nm. 3,75W. Ensayo 1

ENSAYO 1 CON LÁMPARA LED 395nm, POTENCIA = 3,75W

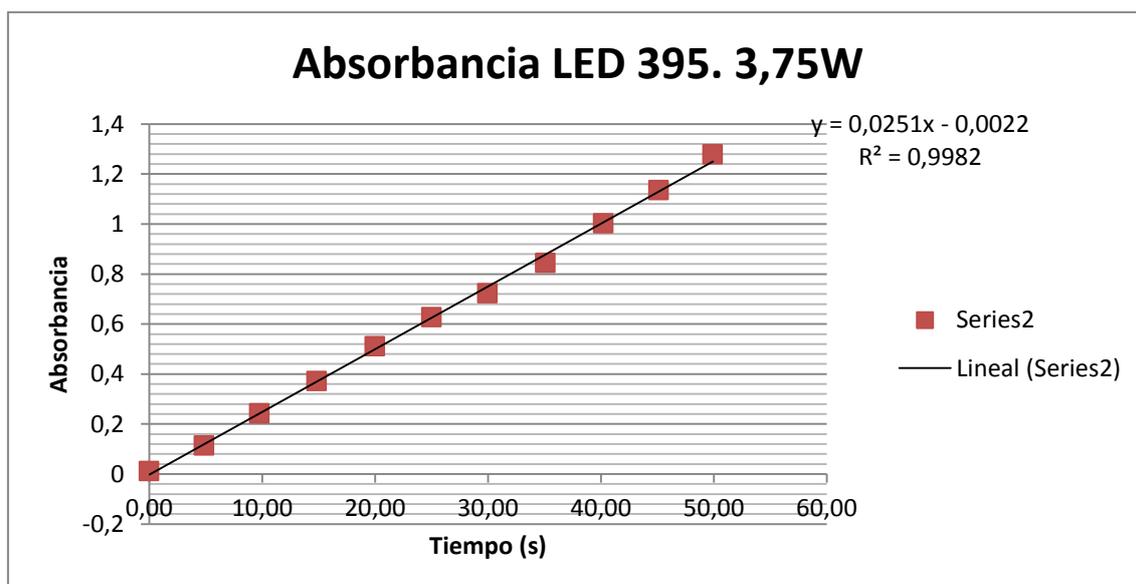


Figura 31. Curva de calibrado para lámpara UV-LED 395nm. 3,75W. Ensayo 1

| Nº | t(s)  | Absorbancia LED 395nm | Magnitud               | Valor      | Unidad                                                       |
|----|-------|-----------------------|------------------------|------------|--------------------------------------------------------------|
| 0  | 0,00  | 0,012                 | V1                     | 100        | ml                                                           |
| 1  | 4,85  | 0,114                 | V2                     | 1          | ml                                                           |
| 2  | 9,76  | 0,243                 | V3                     | 25         | ml                                                           |
| 3  | 14,82 | 0,372                 | $\Delta A$             | 1,267      |                                                              |
| 4  | 20,00 | 0,512                 | I                      | 1          | cm                                                           |
| 5  | 24,99 | 0,628                 | $\epsilon$             | 11100      | L/mol cm                                                     |
| 6  | 29,97 | 0,723                 | moles Fe <sup>2+</sup> | 0,00028536 | mol                                                          |
| 7  | 35,09 | 0,845                 | $\Phi$                 | 1,13       |                                                              |
| 8  | 40,21 | 1,003                 | t                      | 49,91      | s                                                            |
| 9  | 45,12 | 1,136                 | F                      | 1          |                                                              |
| 10 | 49,91 | 1,279                 | Nhv/t                  | 5,0597E-06 | mol phots/s                                                  |
|    |       |                       | Nhv/t                  | 5,05973337 | micromolPho/s                                                |
|    |       |                       | r                      | 0,045      | m                                                            |
|    |       |                       | a                      | 0,00636173 | m <sup>2</sup>                                               |
|    |       |                       | $\pi$                  | 3,14159265 |                                                              |
|    |       |                       |                        | 795,3      | micromoles<br>Photoness/seg m <sup>2</sup><br>=microEinstein |

Tabla 23. Parámetros para el cálculo de potencia de irradiación para lámpara UV-LED 395nm. 3,75W. Ensayo 1

ENSAYO 1 CON LÁMPARA LED 385nm, POTENCIA = 13,5W

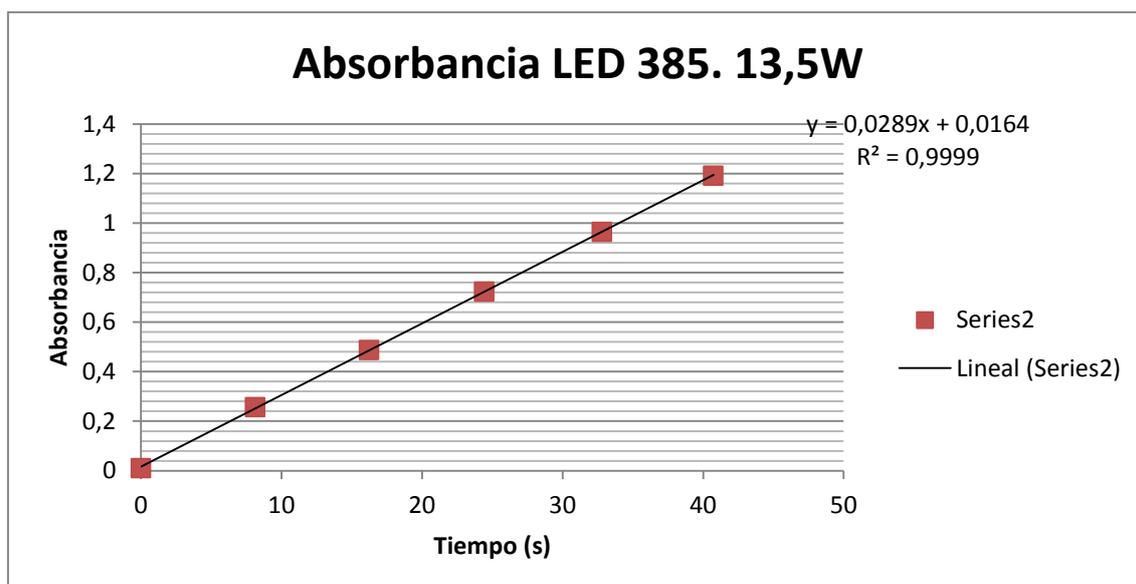


Figura 32. Curva de calibrado para lámpara UV-LED 385nm. 13,5W. Ensayo 1

| Nº | t(s)  | Absorbancia LED 385nm | Magnitud   | Valor      | Unidad                                        |
|----|-------|-----------------------|------------|------------|-----------------------------------------------|
| 0  | 0     | 0,01                  | V1         | 100        | ml                                            |
| 1  | 8,12  | 0,257                 | V2         | 1          | ml                                            |
| 2  | 16,24 | 0,488                 | V3         | 25         | ml                                            |
| 3  | 24,43 | 0,724                 | $\Delta A$ | 1,181      |                                               |
| 4  | 32,80 | 0,965                 | l          | 1          | cm                                            |
| 5  | 40,73 | 1,191                 | $\epsilon$ | 11100      | L/mol cm                                      |
| 6  |       |                       | moles Fe2+ | 0,00026599 | mol                                           |
| 7  |       |                       | $\Phi$     | 1,13       |                                               |
| 8  |       |                       | t          | 40,73      | s                                             |
| 9  |       |                       | F          | 1          |                                               |
| 10 |       |                       | Nhv/t      | 5,7793E-06 | mol pho/s                                     |
|    |       |                       | Nhv/t      | 5,7792845  | micromolPho/s                                 |
|    |       |                       | r          | 0,045      | m                                             |
|    |       |                       | a          | 0,00636173 | m <sup>2</sup>                                |
|    |       |                       | $\pi$      | 3,14159265 |                                               |
|    |       |                       |            | 908,4      | micromoles<br>Photoness/seg<br>m <sup>2</sup> |
|    |       |                       |            |            | =microEinstein                                |

Tabla 24. Parámetros para el cálculo de potencia de irradiación para lámpara UV-LED 385nm. 13,5W. Ensayo 1

REDUCCIÓN DE PATÓGENOS EN AGUA DE CONSUMO Y REUTILIZADAS MEDIANTE APLICACIÓN DE LUZ ULTRAVIOLETA DE BAJO CONSUMO

ENSAYO 1 CON LÁMPARA LED 395nm, POTENCIA = 13,5W

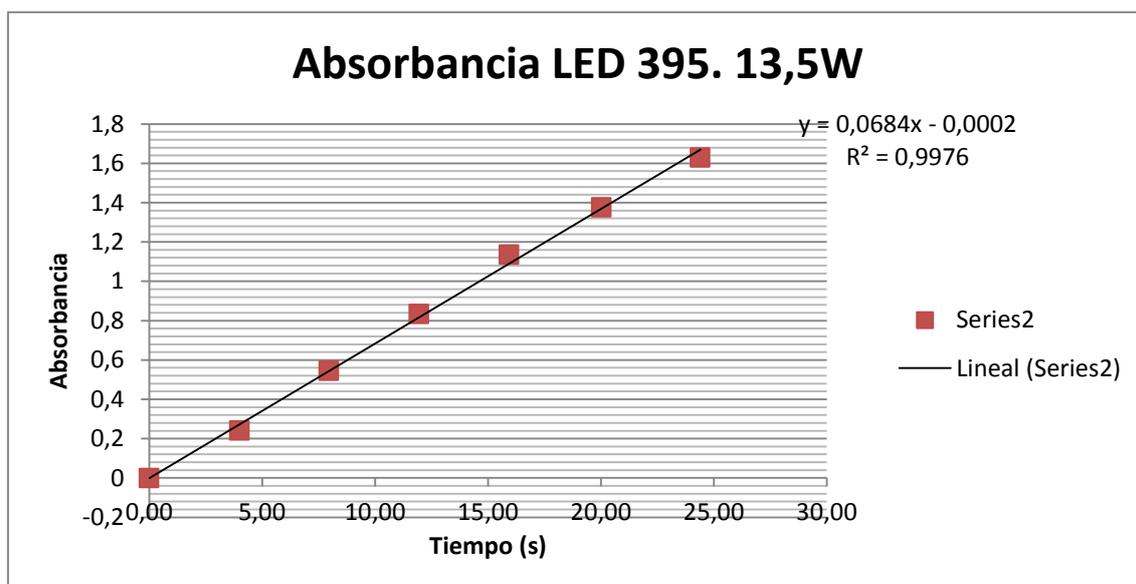


Figura 33. Curva de calibrado para lámpara UV-LED 395nm. 13,5W. Ensayo 1

| Nº | t(s)  | Absorbancia LED 395nm | Magnitud   | Valor      | Unidad                                    |
|----|-------|-----------------------|------------|------------|-------------------------------------------|
| 0  | 0,00  | 0                     | V1         | 100        | ml                                        |
| 1  | 4,00  | 0,241                 | V2         | 1          | ml                                        |
| 2  | 7,95  | 0,545                 | V3         | 25         | ml                                        |
| 3  | 11,95 | 0,834                 | $\Delta A$ | 1,629      |                                           |
| 4  | 15,94 | 1,136                 | l          | 1          | cm                                        |
| 5  | 20,02 | 1,377                 | $\epsilon$ | 11100      | L/mol cm                                  |
| 6  | 24,40 | 1,629                 | moles Fe2+ | 0,00036689 | mol                                       |
| 7  | 28,48 | 1,77                  | $\Phi$     | 1,13       |                                           |
| 8  | 32,43 | 1,855                 | t          | 24,40      | s                                         |
| 9  | 36,37 | 1,725                 | F          | 1          |                                           |
| 10 | 40,37 |                       | Nhv/t      | 1,3307E-05 | mol pho/s                                 |
|    |       |                       | Nhv/t      | 13,306684  | micromolPho/s                             |
|    |       |                       | r          | 0,045      | m                                         |
|    |       |                       | a          | 0,00636173 | m <sup>2</sup>                            |
|    |       |                       | $\pi$      | 3,14159265 |                                           |
|    |       |                       |            | 2091,7     | micromoles Photones/seg<br>m <sup>2</sup> |
|    |       |                       |            |            | =microEinstein                            |

Tabla 25. Parámetros para el cálculo de potencia de irradiación para lámpara UV-LED 395nm. 13,5W. Ensayo 1

ENSAYO 1 CON LÁMPARA LED 365nm, POTENCIA = 8W (8\*)

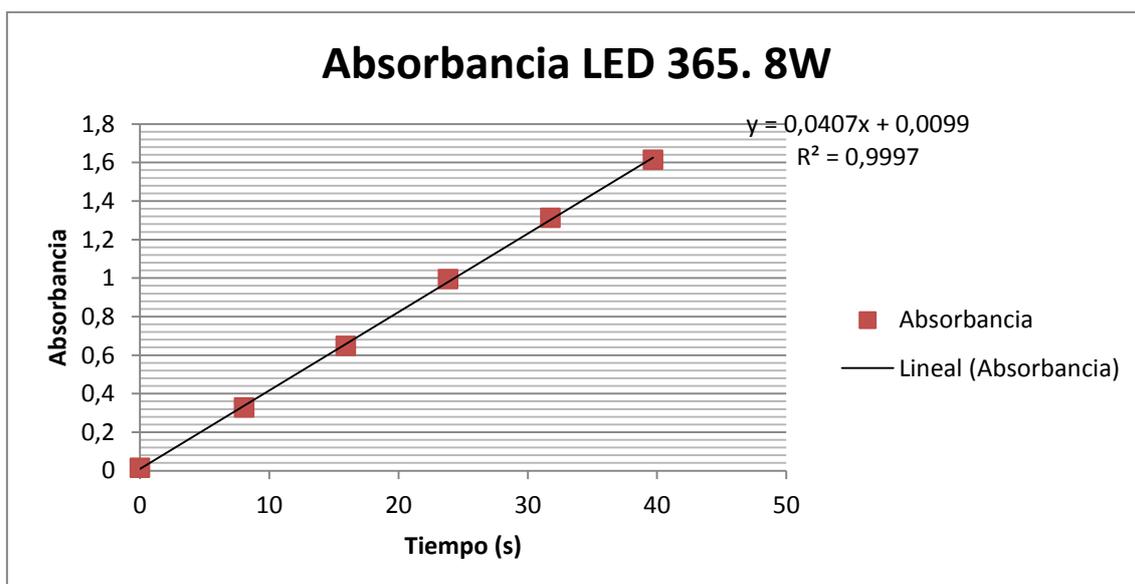


Figura 34. Curva de calibrado para lámpara UV-LED 365nm. 8W. Ensayo 1. \*8 LEDs.

| Nº | t(s)  | Absorbancia LED 365nm | Magnitud               | Valor      | Unidad                                                      |
|----|-------|-----------------------|------------------------|------------|-------------------------------------------------------------|
| 0  | 0     | 0,015                 | V1                     | 100        | ml                                                          |
| 1  | 8,06  | 0,329                 | V2                     | 1          | ml                                                          |
| 2  | 15,92 | 0,648                 | V3                     | 25         | ml                                                          |
| 3  | 23,84 | 0,994                 | $\Delta A$             | 1,599      |                                                             |
| 4  | 31,77 | 1,313                 | l                      | 1          | cm                                                          |
| 5  | 39,70 | 1,614                 | $\epsilon$             | 11100      | L/mol cm                                                    |
| 6  |       |                       | moles Fe <sup>2+</sup> | 0,00036014 | mol                                                         |
| 7  |       |                       | $\Phi$                 | 1,21       |                                                             |
| 8  |       |                       | t                      | 39,70      | s                                                           |
| 9  |       |                       | F                      | 1          |                                                             |
| 10 |       |                       | Nhv/t                  | 7,497E-06  | mol pho/s                                                   |
|    |       |                       | Nhv/t                  | 7,49703635 | micromolPho/s                                               |
|    |       |                       | r                      | 0,045      | m                                                           |
|    |       |                       | a                      | 0,00636173 | m <sup>2</sup>                                              |
|    |       |                       | $\pi$                  | 3,14159265 |                                                             |
|    |       |                       |                        | 1178,5     | micromoles<br>Photones/seg m <sup>2</sup><br>=microEinstein |

Tabla 26. Parámetros para el cálculo de potencia de irradiación para lámpara UV-LED 365nm. 8W. Ensayo 1. \*8 LEDs.

REDUCCIÓN DE PATÓGENOS EN AGUA DE CONSUMO Y REUTILIZADAS MEDIANTE APLICACIÓN DE LUZ ULTRAVIOLETA DE BAJO CONSUMO

ENSAYO 1 CON LÁMPARA LED 385nm, POTENCIA = 8W

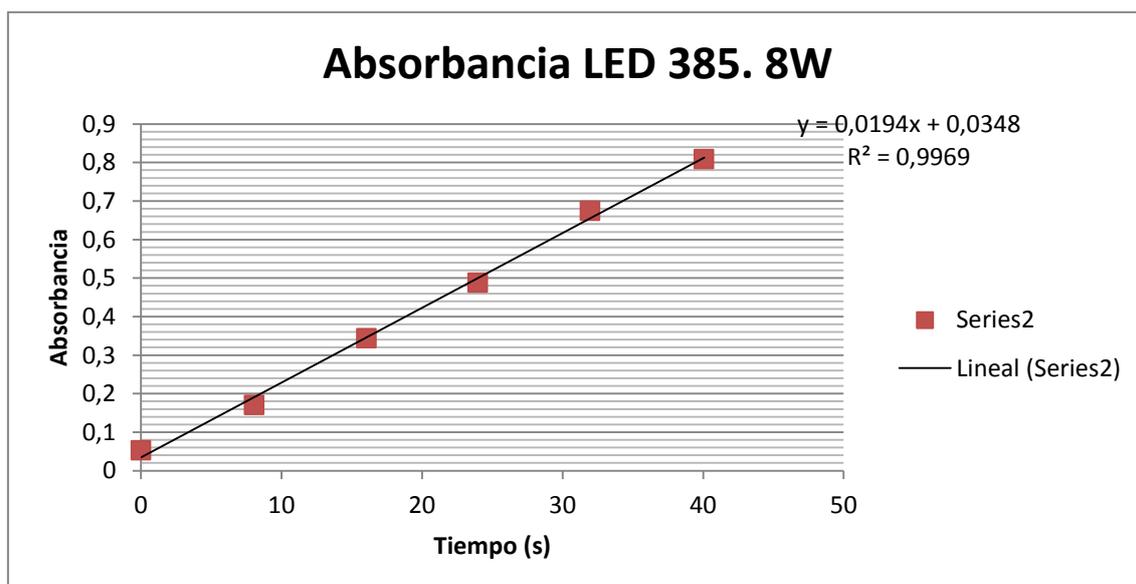


Figura 35. Curva de calibrado para lámpara UV-LED 385nm. 8W. Ensayo 1.

| Nº | t(s)  | Absorbancia LED 385nm | Magnitud   | Valor      | Unidad                        |
|----|-------|-----------------------|------------|------------|-------------------------------|
| 0  | 0     | 0,053                 | V1         | 100        | ml                            |
| 1  | 8,05  | 0,171                 | V2         | 1          | ml                            |
| 2  | 16,04 | 0,344                 | V3         | 25         | ml                            |
| 3  | 23,97 | 0,488                 | $\Delta A$ | 0,756      |                               |
| 4  | 31,95 | 0,675                 | l          | 1          | cm                            |
| 5  | 40,07 | 0,809                 | $\epsilon$ | 11100      | L/mol cm                      |
| 6  |       |                       | moles Fe2+ | 0,00017027 | mol                           |
| 7  |       |                       | $\Phi$     | 1,13       |                               |
| 8  |       |                       | t          | 40,07      | s                             |
| 9  |       |                       | F          | 1          |                               |
| 10 |       |                       | Nhv/t      | 3,7605E-06 | mol pho/s                     |
|    |       |                       | Nhv/t      | 3,76046057 | micromolPho/s                 |
|    |       |                       | r          | 0,045      | m                             |
|    |       |                       | a          | 0,00636173 | m²                            |
|    |       |                       | $\pi$      | 3,14159265 |                               |
|    |       |                       |            | 591,1      | micromoles<br>Photonos/seg m² |
|    |       |                       |            |            | microEinstein                 |

Tabla 27. Parámetros para el cálculo de potencia de irradiación para lámpara UV-LED 385nm. 8W. Ensayo 1.

REDUCCIÓN DE PATÓGENOS EN AGUA DE CONSUMO Y REUTILIZADAS MEDIANTE APLICACIÓN DE LUZ ULTRAVIOLETA DE BAJO CONSUMO

ENSAYO 1 CON LÁMPARA LED 395nm, POTENCIA = 8W

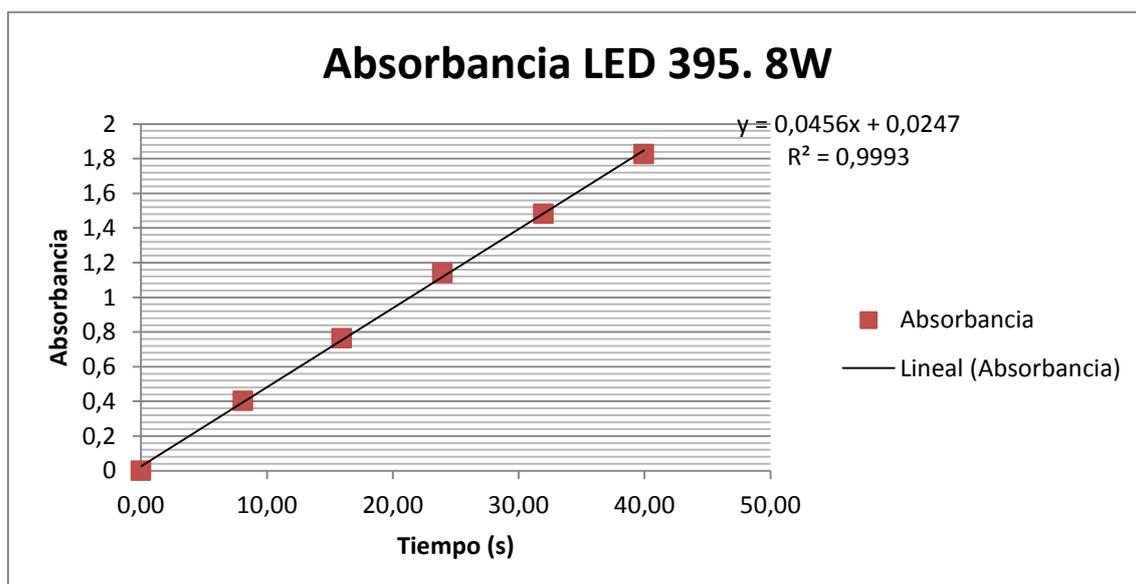


Figura 36. Curva de calibrado para lámpara UV-LED 395nm. 8W. Ensayo 1.

| Nº | t(s)  | Absorbancia LED 395nm | Magnitud   | Valor       | Unidad                                                       |
|----|-------|-----------------------|------------|-------------|--------------------------------------------------------------|
| 0  | 0,00  | 0,001                 | V1         | 100         | ml                                                           |
| 1  | 8,11  | 0,404                 | V2         | 1           | ml                                                           |
| 2  | 15,96 | 0,765                 | V3         | 25          | ml                                                           |
| 3  | 23,95 | 1,14                  | $\Delta A$ | 1,827       |                                                              |
| 4  | 31,97 | 1,483                 | l          | 1           | cm                                                           |
| 5  | 39,96 | 1,828                 | $\epsilon$ | 11100       | L/mol cm                                                     |
| 6  |       |                       | moles Fe2+ | 0,000411486 | mol                                                          |
| 7  |       |                       | $\Phi$     | 1,13        |                                                              |
| 8  |       |                       | t          | 39,96       | s                                                            |
| 9  |       |                       | F          | 1           |                                                              |
| 10 |       |                       | Nhv/t      | 9,1128E-06  | mol pho/s                                                    |
|    |       |                       | Nhv/t      | 9,112796125 | micromolPho/s                                                |
|    |       |                       | r          | 0,045       | m                                                            |
|    |       |                       | a          | 0,006361725 | m <sup>2</sup>                                               |
|    |       |                       | $\pi$      | 3,141592654 |                                                              |
|    |       |                       |            | 1432,4      | micromoles<br>Photoness/seg m <sup>2</sup><br>=microEinstein |

Tabla 28. Parámetros para el cálculo de potencia de irradiación para lámpara UV-LED 395nm. 8W. Ensayo 1.

A continuación, aparecen resumidos los resultados obtenidos de: irradiación, por segundo y metro cuadrado, cantidad de energía emitida, etc. para cada lámpara y longitud de onda

REDUCCIÓN DE PATÓGENOS EN AGUA DE CONSUMO Y REUTILIZADAS MEDIANTE APLICACIÓN DE LUZ ULTRAVIOLETA DE BAJO CONSUMO

|                                           | Lámpara UV convencional 13,5W |           |           |           |           |           |
|-------------------------------------------|-------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Longitud de onda                          | 254 nm                        |           |           | 366 nm    |           |           |
| Prueba                                    | Prueba 1                      | Prueba 2  | Prueba 3  | Prueba 1  | Prueba 2  | Prueba 3  |
| $\mu\text{E}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ | 32,57                         | 35,88     | 34,55     | 55,79     | 69,54     | 68,56     |
| J/E                                       | 470954,74                     | 470954,74 | 470954,74 | 326837,44 | 326837,44 | 326837,44 |
| W/m <sup>2</sup>                          | 15,34                         | 16,90     | 16,27     | 18,23     | 22,73     | 22,41     |
| W                                         | 0,10                          | 0,11      | 0,10      | 0,12      | 0,14      | 0,14      |

Tabla 29. Potencia de irradiación lámpara UV convencional a 254 y 366 nm de longitud de onda

| Lámpara LED 8W (10)* |           |           |
|----------------------|-----------|-----------|
| 365nm                |           |           |
| Prueba 1             | Prueba 2  | Prueba 3  |
| 1661,43              | 1672,03   | 1817,75   |
| 327732,89            | 327732,89 | 327732,89 |
| 544,51               | 547,98    | 595,74    |
| 3,46                 | 3,49      | 3,79      |

Tabla 30. Potencia de irradiación lámpara UV-LED a 365nm. \*Con 10 LEDs.

| Lámpara LED 13,5W (8)* |           |           | Lámpara LED 29,25W |
|------------------------|-----------|-----------|--------------------|
| 365nm                  |           |           | 400-700nm          |
| Prueba 1               | Prueba 2  | Prueba 3  | Prueba 1           |
| 2287,22                | 2063,72   | 2335,05   | 20520,40           |
| 327732,89              | 327732,89 | 327732,89 | 217495,4601        |
| 749,60                 | 676,35    | 765,27    | 4463,09            |
| 4,77                   | 4,30      | 4,87      | 28,39              |

Tabla 31. Potencia de irradiación lámpara UV-LED a 365nm de longitud de onda. 13,5W y LED visible 29,25W. \*Con 8 LEDs.

| Lámpara LED 3,75W | Lámpara LED 3,75W | Lámpara LED 3,75W |
|-------------------|-------------------|-------------------|
| 365nm             | 385nm             | 395nm             |
| Prueba 1          | Prueba 1          | Prueba 1          |
| 688,44            | 214,93            | 795,34            |
| 327732,89         | 310707,80         | 302841,78         |
| 225,63            | 66,78             | 240,86            |
| 1,44              | 0,42              | 1,53              |

Tabla 32. Potencia de irradiación lámpara UV-LED a 365, 385, 395nm a 3,75W.

REDUCCIÓN DE PATÓGENOS EN AGUA DE CONSUMO Y REUTILIZADAS MEDIANTE APLICACIÓN DE LUZ ULTRAVIOLETA DE BAJO CONSUMO

| Lámpara LED 8W (8)* | Lámpara LED 8W | Lámpara LED 8W |
|---------------------|----------------|----------------|
| 365nm               | 385nm          | 395nm          |
| Prueba 1            | Prueba 1       | Prueba 1       |
| 1178,46             | 591,11         | 1432,44        |
| 327732,89           | 310707,80      | 302841,78      |
| 386,22              | 183,66         | 433,80         |
| 2,46                | 1,17           | 2,76           |

Tabla 33. Potencia de irradiación lámpara UV-LED a 365, 385, 395nm a 8W.\*Con 8 LEDs.

| Lámpara LED 13,5W | Lámpara LED 13,5W |
|-------------------|-------------------|
| 385nm             | 395nm             |
| Prueba 1          | Prueba 1          |
| 908,45            | 2091,68           |
| 310707,80         | 302841,78         |
| 282,26            | 633,45            |
| 1,80              | 4,03              |

Tabla 34. Potencia de irradiación lámpara UV-LED a 385, 395nm a 8W.

Para expresar la potencia de irradiación de las lámparas en W, calculamos los julios que tiene un Einstein (J/E) mediante la siguiente ecuación (8):

$$\frac{J}{E} = \frac{N \cdot h \cdot C}{\lambda} \quad (8)$$

|                                        |                        |
|----------------------------------------|------------------------|
| N                                      | 6,022·10 <sup>23</sup> |
| h (J·s)                                | 6,626·10 <sup>34</sup> |
| C (m/s)                                | 299792458              |
| Superficie irradiada (m <sup>2</sup> ) | 0,006361725            |

Dónde: N= Número de Avogadro  
h= Constante de Plank (J·s)  
C= Velocidad de la luz (m/s)  
λ= Longitud de onda (m)

En el caso de la lámpara LED visible es necesario aplicar la ley de integración en la ecuación 8. Se aplica la ecuación que define la intensidad relativa para cada longitud de onda del espectro. La ecuación que define la gráfica de intensidad relativa en cada longitud de onda es la siguiente.

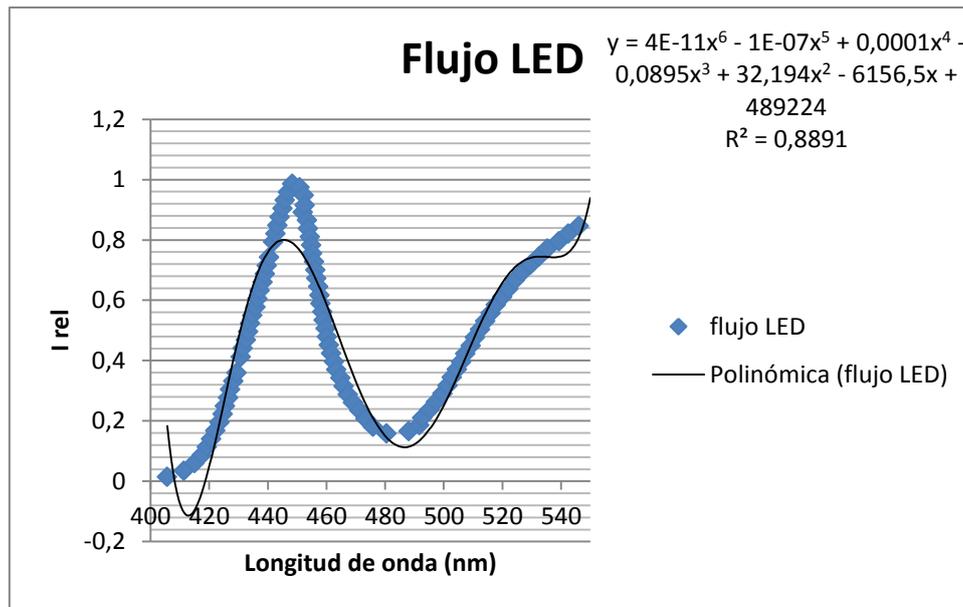


Figura 37. Gráfica Intensidad relativa en el espectro visible.

Sustituyendo la ecuación de la gráfica en la ecuación 8 y realizando la integral entre 400 y 550

nm se obtiene la siguiente expresión:  $\frac{J}{E} = 9,9297 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{N \cdot h \cdot C}{10^{-9}} = 11.878,16J/E$

Expresándolo en  $W/m^2 = 243,74 W/m^2$

#### ANEXO IV. MEDIOS DE CULTIVO PARA COLIFORMES

Se dispone de dos medios de cultivo para coliformes, m-FC Agar (de color rojo) y Chromocult® Coliformes Agar (de color amarillo).

##### **m-FC Agar (de color rojo):**

##### PRODUCTO:

M-FC AGAR 60 mm. Placas de 60 mm de diámetro.

##### USO:

El M-FC Agar (Medio para Coliformes Fecales) es un medio selectivo para aislamiento, diferenciación y enumeración de coliformes fecales en aguas y líquidos en general, mediante la técnica de filtración de membrana.

##### MODO DE ACCIÓN:

La incubación de las muestras inoculadas debe realizarse a 44.5°C en la técnica de filtración de membrana. Si la incubación se realiza a 37°C se convierte en un medio moderadamente selectivo para aislamiento, diferenciación y enumeración de Enterobacterias.

El Azul de Anilina actúa como indicador de pH. Los coliformes, por su actividad fermentadora de lactosa, acidifican el medio generando colonias azules, mientras que los no fermentadores darán colonias grises.

Las proteínas del hidrolizado de carne (triptosa) aportan la fuente de nitrógeno, la lactosa es el sustrato de fermentación diferenciador, las sales biliares inhiben a las bacterias Gram positivas. El Cloruro Sódico consigue la concentración osmótica adecuada.

##### COMPOSICION POR LITRO DE MEDIO EN AGUA PURIFICADA (g/l):

|                          |       |
|--------------------------|-------|
| Triptosa                 | 10,0  |
| Extracto de levadura     | 3,0   |
| Peptona proteosa         | 5,0   |
| Sales biliares           | 4,5   |
| Cloruro de sodio         | 5,0   |
| Lactosa                  | 12,5  |
| Azul anilina             | 0,1   |
| Agar                     | 15,0  |
| Sol 1% de ácido rosólico | 10 ml |

Tabla 35. Composición medio de cultivo m-FC Agar

## REDUCCIÓN DE PATÓGENOS EN AGUA DE CONSUMO Y REUTILIZADAS MEDIANTE APLICACIÓN DE LUZ ULTRAVIOLETA DE BAJO CONSUMO

pH : 7,4+/- 0,2.

### PRECAUCIONES:

Este producto es para uso exclusivo de profesionales.

No debe ser utilizado en caso de presentar contaminación microbiana, decoloración, signos de deshidratación, roturas u otros signos de deterioro.

Utilizar bajo procedimientos de laboratorio, tratar siempre como material biopeligroso.

### ALMACENAMIENTO Y VIDA UTIL:

Una vez recibidas en el laboratorio, almacenar en lugar oscuro y seco a una temperatura de 8°C, en su embalaje original hasta el momento de uso.

Evitar la congelación y el sobrecalentamiento.

Las placas deben estar a temperatura ambiente antes de ser inoculadas.

No deben utilizarse con posterioridad a la fecha de caducidad.

Las bolsas deben ser abiertas cuando vayan a ser utilizadas, una vez abiertas las que no se utilicen deberán mantenerse en áreas limpias y refrigeradas.

### CONTROL DE CALIDAD:

Estas placas han sido inoculadas con las cepas que a continuación se indican, incubadas a las temperaturas indicadas durante 24 horas, obteniendo los siguientes crecimientos y color de colonia.

| <b>Cepa</b>                              | <b>Incubada a 44.5 +/- 2°C</b> | <b>Color colonia</b> | <b>Incubada a 35 +/- 2 °C</b> | <b>Color colonia</b> |
|------------------------------------------|--------------------------------|----------------------|-------------------------------|----------------------|
| <i>E. coli</i> ATCC 25922                | Buen crecimiento               | Azul                 | Bueno                         | Azul                 |
| <i>Salmonella typhimurium</i> ATCC 14028 | Inhibido                       | -                    | Bueno                         | Gris                 |
| <i>Enterobacter aerogenes</i> ATCC 13048 | Inhibido                       | -                    | Bueno                         | Gris a crema         |
| <i>Streptococcus faecalis</i> ATCC 19433 | Inhibido                       | -                    | Inhibido                      | -                    |

Tabla 36. Coloración de colonias en m-FC Agar

## REDUCCIÓN DE PATÓGENOS EN AGUA DE CONSUMO Y REUTILIZADAS MEDIANTE APLICACIÓN DE LUZ ULTRAVIOLETA DE BAJO CONSUMO

El medio sin inocular presenta un color azul con ligera opalescencia.

### CARACTERÍSTICAS Y LIMITACIONES DE USO:

En la técnica de filtración por membrana, el filtro de membrana a incubar debe colocarse sobre la superficie del medio y la superficie donde se han retenido las bacterias hacia arriba.

La incubación debe realizarse a las dos temperaturas indicadas.

Este es el caso de algunas especies de *Klebsiella*, para diferenciarlas del grupo de coliformes.

Es una técnica cuantitativa para coliformes fecales, pudiendo ser necesaria la dilución de la muestra en algunas situaciones [20].

### **Chromocult® Coliformes Agar (de color amarillo):**

Este medio de cultivo se emplea para análisis de agua potable y aguas con poco fondo bacteriano: este medio de cultivo cumple con las especificaciones dadas por la norma EN ISO 9308-1.

El método de filtro de membrana Chromocult® Coliform Agar ha sido aprobado y aceptado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés) para el monitoreo de bacterias coliformes totales y *E. coli* bajo la Regla de Coliformes Totales (40 CFR 141.21).

### MODO DE ACCIÓN:

La interacción de peptonas seleccionadas, piruvato, sorbitol y tampón de fosfato promueve el rápido crecimiento de colonias, incluso para bacterias coliformes lesionadas de forma letal. El crecimiento de bacterias Gram-positivas, así como ciertas bacterias Gram-negativas, se inhibe por la presencia de Tergitol®7 que no tiene ningún efecto negativo en el crecimiento de bacterias coliformes.

Además, la combinación de dos sustratos cromogénicos permite la detección simultánea de bacterias coliformes y *E. coli*.

Detección de bacterias coliformes: El sustrato Salmon-GAL se utiliza para la detección de la actividad de la  $\beta$ -D-galactosidasa, que es característica de las bacterias coliformes. Esta interacción da como resultado un color rosa a rojo de las colonias de coliformes.

## REDUCCIÓN DE PATÓGENOS EN AGUA DE CONSUMO Y REUTILIZADAS MEDIANTE APLICACIÓN DE LUZ ULTRAVIOLETA DE BAJO CONSUMO

Detección de *E. coli*: El sustrato X-glucurónido se usa para la detección de la actividad de la  $\beta$ -D-glucuronidasa, que es característica de *E. coli*.

*E. coli* escinde tanto Salmon-GAL como X-glucurónido, de esta forma las colonias positivas adquieren un color que va del azul oscuro al violeta. Estos se distinguen fácilmente de otras colonias de coliformes, que tienen un color rosado a rojo.

Algunas *E. coli* (3-4%) son  $\beta$ -D-glucuronidasa negativas y aparecen como colonias de color rosa a rojo, p. Ej. La mayoría de las cepas de *E. coli* O157. Para la detección de *E. coli* O157 se deben utilizar medios de cultivo específicos.

La flora acompañante aparece como colonias incoloras, excepto en algunos organismos, que poseen actividad  $\beta$ -Dglucuronidase. Estas colonias aparecen de color azul claro a turquesa.

### COMPOSICIÓN POR LITRO DE MEDIO EN AGUA PURIFICADA (g/l):

|                                                     |        |
|-----------------------------------------------------|--------|
| Digestión enzimática de caseína                     | 1,000  |
| Extracto de levadura                                | 2,000  |
| Cloruro de sodio                                    | 5.000  |
| Dihidrógeno fosfato de sodio                        | 2,200  |
| Fosfato de hidrógeno disódico                       | 2,700  |
| Piruvato de sodio                                   | 1,000  |
| L-triptófano                                        | 1.000  |
| Sorbitol                                            | 1,000  |
| Tergitol® 7                                         | 0,150  |
| 6-cloro-3-indoxil-beta-D-galactopiranosido          | 0,200  |
| Ácido 5-bromo-4-cloro-3-indoxil-D-glucurónico       | 0,100  |
| Isopropil- $\beta$ -D-1-tiogalactopiranosido (IPTG) | 0,100  |
| Cefsulodina                                         | 0,005  |
| Vancomicina                                         | 0,005  |
| Agar                                                | 10,000 |

Tabla 37. Composición medio de cultivo Chromocult® Coliformes Agar

pH : 6,8 +/- 0,2.

### ALMACENAMIENTO Y VIDA UTIL:

Almacenar el medio deshidratado seco y bien cerrado. Proteger de la luz. No utilice medios agrupados o decolorados. Almacene entre + 15°C y + 25°C y use antes de la fecha de caducidad que figura en la etiqueta.

De acuerdo con la norma EN ISO 9308-1, las placas auto-preparadas pueden almacenarse a una temperatura de entre +2°C y +8°C en la oscuridad y protegerse contra la evaporación durante al menos un mes.

REDUCCIÓN DE PATÓGENOS EN AGUA DE CONSUMO Y REUTILIZADAS MEDIANTE APLICACIÓN DE LUZ ULTRAVIOLETA DE BAJO CONSUMO

CONTROL DE CALIDAD:

| Función       | Cepas de control                                | Incubación          | Medio de referencia      | Método de control                                              | Resultados previstos                                                    |
|---------------|-------------------------------------------------|---------------------|--------------------------|----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Productividad | <i>Escherichia coli</i><br>ATCC 25922           | 18-24h a<br>35-37°C | Agar tríptico<br>de soja | Cuantitativo<br>con filtración<br>por membrana                 | Recuperación ≥<br>70%, colonias<br>de azul oscuro<br>a violeta.         |
|               | <i>Escherichia coli</i><br>ATCC 8739            |                     |                          |                                                                |                                                                         |
|               | <i>Enterobacter<br/>aerogenes</i><br>ATCC 13048 | 18-24h a<br>35-37°C | Agar tríptico<br>de soja | Cuantitativo<br>con filtración<br>por membrana                 | Recuperación ≥<br>70%, colonias<br>rosadas a rojas.                     |
|               | <i>Citrobacter<br/>freundii</i><br>ATCC 43864   |                     |                          |                                                                |                                                                         |
|               | <i>Klebsiella<br/>pneumoniae</i><br>ATCC 31488  |                     |                          |                                                                |                                                                         |
| Selectividad  | <i>Enterococcus<br/>faecalis</i><br>ATCC 19433  | 18-24h a<br>35-37°C |                          | Cualitativo con<br>filtración por<br>membrana<br>cuantitativa. | Inhibición<br>parcial,<br>colonias<br>incolores                         |
| Especificidad | <i>Pseudomonas<br/>aeruginosa</i><br>ATCC 10145 | 18-24h a<br>35-37°C |                          | Cualitativo con<br>filtración por<br>membrana<br>cuantitativa. | Sin límite de<br>recuperación<br>especificado,<br>colonias<br>incolores |

Tabla 38. Coloración de colonias en Chromocult® Coliformes Agar

La prueba de rendimiento está de acuerdo con la versión actual de EN ISO 11133 y EN ISO 9308-1 utilizando filtros de éster de celulosa mixta EMD Millipore (tamaño de poro de 0,45 µm) [27].

Una tasa de recuperación del 70% es equivalente a un valor de productividad de 0.7.

CARACTERÍSTICAS Y LIMITACIONES DE USO:

Para el análisis de aguas potables y con bajo fondo bacteriano, se suele combinar la norma ISO 9308-1 con la filtración por membrana.

Nota: El tipo y la calidad del filtro de membrana afectan significativamente el tamaño, la coloración y el número de colonias. En los estudios de validación ISO (Lange et al. 2013) se utilizaron filtros de éster de celulosa mixta Millipore (reticulados, tamaño de poro de 0,45 µm,

## REDUCCIÓN DE PATÓGENOS EN AGUA DE CONSUMO Y REUTILIZADAS MEDIANTE APLICACIÓN DE LUZ ULTRAVIOLETA DE BAJO CONSUMO

EZ-Pak™, EMD) y apoyaron la formación de color y el crecimiento de colonias de manera eficiente.

- Filtrar el volumen apropiado de muestra (por ejemplo, 100 ml de agua potable municipal, 250 ml de agua embotellada) con un filtro de membrana.
- Coloque el filtro en la placa CCA asegurándose de que no haya aire atrapado debajo.
- Incubar los platos inoculados aeróbicamente en una posición invertida a  $36^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  durante 21-24 h

Nota: No incube por más de 24 h para reducir el riesgo de contar microorganismos no deseados con colores de colonias similares.

- Después de la incubación, examine los filtros de membrana y cuente todas las colonias que dan una reacción positiva de  $\beta$ -D-galactosidasa y  $\beta$ -D-glucuronidasa (azul oscuro a violeta) como *E. coli*.
- Cuente todas las colonias que dan una reacción positiva de  $\beta$ -D-galactosidasa (rosa a rojo) como presuntas bacterias coliformes que no son *E. coli*.
- Confirme las colonias de color rosa a rojo mediante una reacción de oxidasa negativa (para evitar resultados falsos positivos causados por bacterias positivas a la oxidasa como *Aeromonas spp.*).

Nota: En los estudios de validación ISO, la actividad de la oxidasa de presuntas colonias coliformes se probó utilizando la prueba Bactident® Oxidase (número de artículo 113300).

### ESTUDIOS DE VALIDACIÓN:

EN ISO 9308-1: 2014. El rendimiento de Chromocult® Coliform Agar se validó de acuerdo con la norma ENV ISO 13843 ("Calidad del agua: Guía para la validación de métodos microbiológicos") mediante el uso de cultivos puros y muestras de agua contaminada de forma natural. Las muestras se procesaron de acuerdo con la norma ISO 9308-1 utilizando filtros de membrana EZ-Pak (EMD) para la filtración. En total, se seleccionaron al azar 220 colonias, incluidas las bacterias típicas de *E. coli* y coliformes, así como las colonias atípicas, para determinar las características fundamentales de la ACC.

Los resultados muestran que Chromocult® Coliform Agar acc. ISO 9308-1 es un método confiable para la cuantificación de *E. coli* y bacterias coliformes.

US-EPA. El método de filtro de membrana Chromocult® Coliform Agar ha sido aprobado y aceptado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés) para el monitoreo de bacterias coliformes totales y *E. coli* bajo la Regla de Coliformes Totales (40 CFR 141.21).

## REDUCCIÓN DE PATÓGENOS EN AGUA DE CONSUMO Y REUTILIZADAS MEDIANTE APLICACIÓN DE LUZ ULTRAVIOLETA DE BAJO CONSUMO

En los estudios de validación para la detección de bacterias coliformes totales y *E. coli* en el agua potable, el Chromocult® Coliform Agar suplementado con el método de cefsulodina 2,5 mg / L se comparó con el método de referencia aprobado por la EPA (mENDO LES Agar).

El método Chromocult® Coliform Agar ofreció una identificación y medición precisa de las bacterias coliformes totales y *E. coli* [31].

## ANEXO V. ANÁLISIS EN LABORATORIO DE AGUA RESIDUAL DE LA EDAR DE MEDINACELI.

Con el fin de conocer diferentes parámetros del agua que estamos desinfectando, realizamos pruebas en el laboratorio de: DQO, sólidos totales en suspensión en el agua, pH del agua, y conductividad eléctrica del agua.

Las muestras de agua se recogieron los siguientes días:

|           |           |
|-----------|-----------|
| Muestra 1 | 20/2/2019 |
| Muestra 2 | 11/3/2019 |

### DQO:

Realizamos una prueba para analizar la DQO, demanda química de oxígeno, de las aguas de la EDAR de Medinaceli. Realizamos por duplicado muestras del agua del 20/2/2019) y del 11/3/2019. Añadimos a 2,5ml de muestra, 3,5ml de  $H_2SO_4$  y 1,5ml de  $K_2Cr_2O_4 + H_2SO_4$ . Se dejó durante 2h en tubos de ensayo para análisis de DQO cerrados, a 150 °C. Después se midió la absorbancia a 600 nm de longitud de onda. El blanco se preparó añadiendo 2,5 ml de agua destilada, 3,5 ml de  $H_2SO_4$  y 1,5 ml de  $K_2Cr_2O_4 + H_2SO_4$ . Se dejó durante 2h en un tubo de ensayo para análisis de DQO cerrado, a 150 °C.

La curva de calibrado patrón se realizó con los siguientes datos:

| Patrones DQO |             |
|--------------|-------------|
| DQO          | Absorbancia |
| 0            | 0           |
| 100          | 0,047       |
| 200          | 0,091       |
| 300          | 0,126       |
| 500          | 0,216       |
| 700          | 0,288       |
| 900          | 0,359       |

Tabla 39. Curva de calibrado DQO

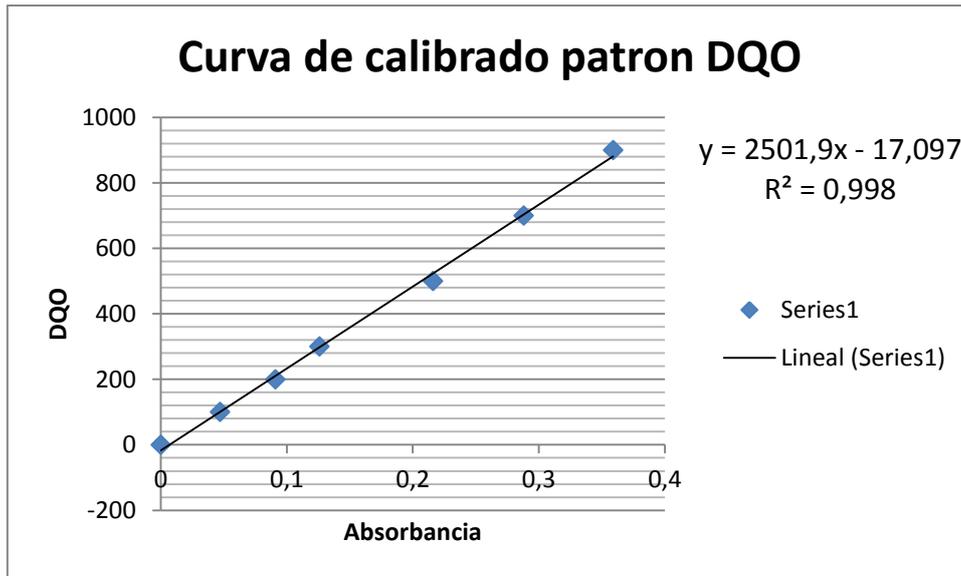


Figura 38. Curva de calibrado patrón para calculo DQO

Los valores de DQO obtenidos para las dos muestras fueron los siguientes:

|                  | Absorbancia 600nm | DQO     |
|------------------|-------------------|---------|
| <b>Muestra 1</b> | 0,0015            | 3,75285 |
| <b>Muestra 2</b> | 0,0025            | 6,25475 |

Tabla 40. Valores de DQO de las muestras de agua

#### Sólidos en el agua:

Para el análisis de los sólidos en el agua, pesamos los filtros por duplicado para cada muestra de agua. Después se secaron los filtros en estufa durante 1 día a 50 °C, o unas horas a 90 °C, para eliminar toda el agua. Sacamos los filtros de la estufa una vez secos y los pesamos de nuevo. Se introducen en la mufla durante 30 min a 550 °C y se pesan después.

Mediante las siguientes ecuaciones obtenemos los valores de:

Sólidos totales = (P estufa-P filtro)/Volumen de agua

Cenizas = (P mufla-P filtro)/ Volumen de agua

Sólidos volátiles (biomasa) = Sólidos totales-Cenizas

Se obtuvieron los siguientes valores de: Sólidos totales, cenizas, y sólidos volátiles (biomasa):

|          | SST (mg/l) | S cenizas (mg/l) | S volátiles (biomasa) (mg/l) |
|----------|------------|------------------|------------------------------|
| <b>1</b> | 10,75      | 2                | 8,75                         |
| <b>2</b> | 9,00       | 0                | 10,75                        |

Tabla 41. Valores sólidos en muestras de agua

## REDUCCIÓN DE PATÓGENOS EN AGUA DE CONSUMO Y REUTILIZADAS MEDIANTE APLICACIÓN DE LUZ ULTRAVIOLETA DE BAJO CONSUMO

### pH del agua:

Los valores obtenidos de pH con el pH-metro digital fueron los siguientes:

| Nº muestra | pH   |
|------------|------|
| (1)        | 7,84 |
| (2)        | 7,55 |

Tabla 42. Valores pH en muestras de agua

### Conductividad eléctrica del agua:

Los valores obtenidos de conductividad eléctrica con el conductímetro digital fueron los siguientes:

| Muestra | Conductividad (mS/cm) a 25°C | Tª agua medida (°C) |
|---------|------------------------------|---------------------|
| 1       | 7,28                         | 11,3                |
| 2       | 8,00                         | 10,4                |

Tabla 43. Valores conductividad eléctrica en muestras de agua

## ANEXO VI. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE DESINFECCIÓN

A continuación se muestran los gráficos de los resultados de cada prueba de desinfección en términos de número de colonias de bacterias, porcentaje de supervivencia y logaritmo de inactivación.

- Para la lámpara UV-LED 365nm, 8W (10\*):

Al aumentar el tiempo de exposición del agua contaminada a la luz ultravioleta se observa un decremento del número de bacterias coliformes totales tanto *E.coli* como *E. aerogenes* en el medio de cultivo rojo (Figura 39). Lo mismo ocurre en el agar amarillo, donde además se aprecia una disminución de *C. freundii*, *E. faecalis*, *K. pneumoniae* y *P. aeruginosa* (Figura 40).

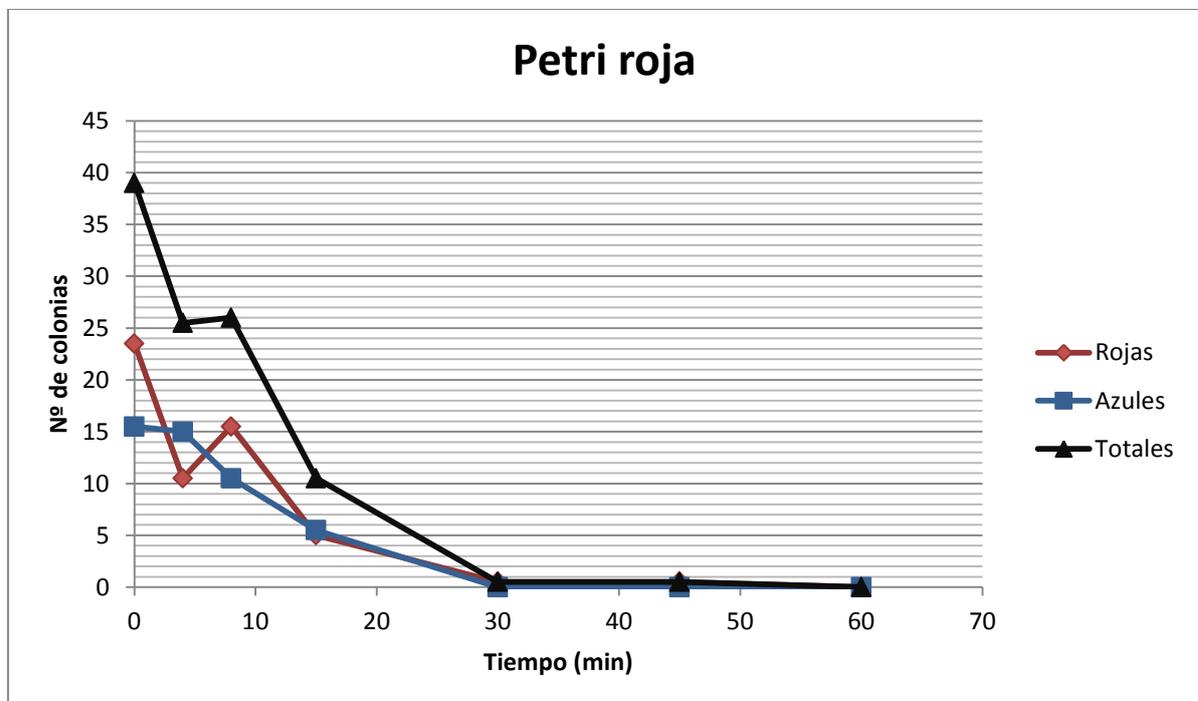


Figura 39. Nº de colonias en agar rojo, respecto al tiempo de desinfección. UV-LED 365nm, 8W 10 LEDs.

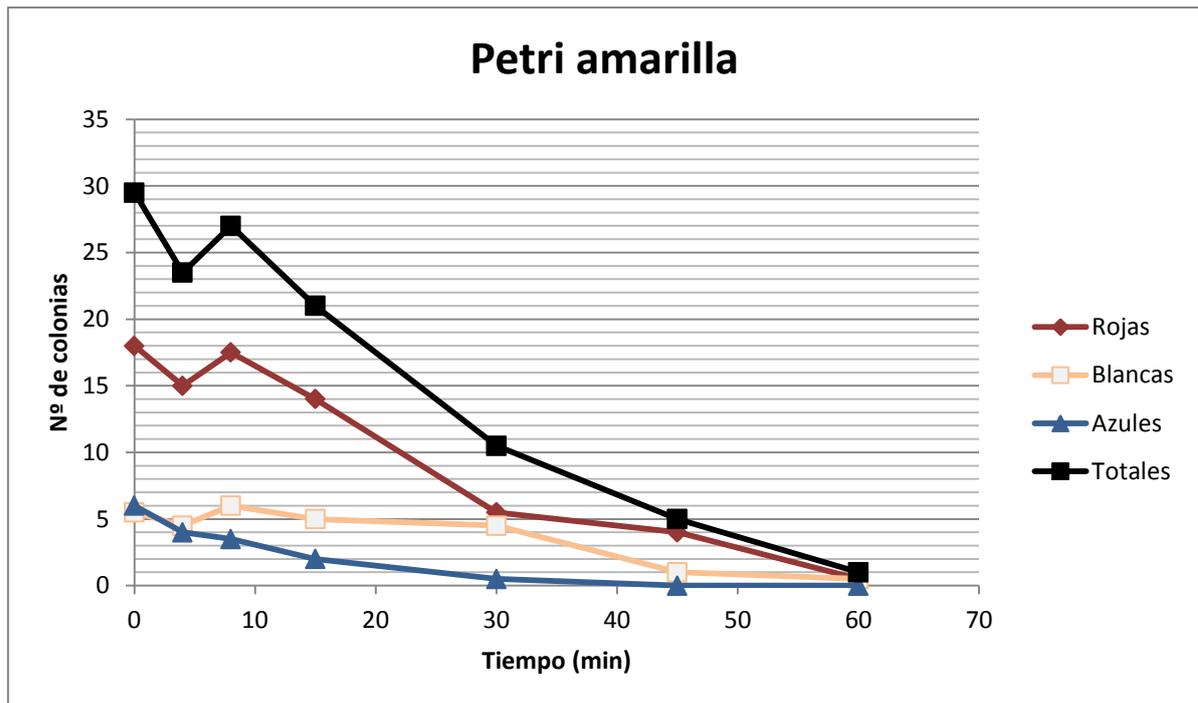


Figura 40. Nº de colonias en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. UV-LED 365nm, 8W 10 LEDs.

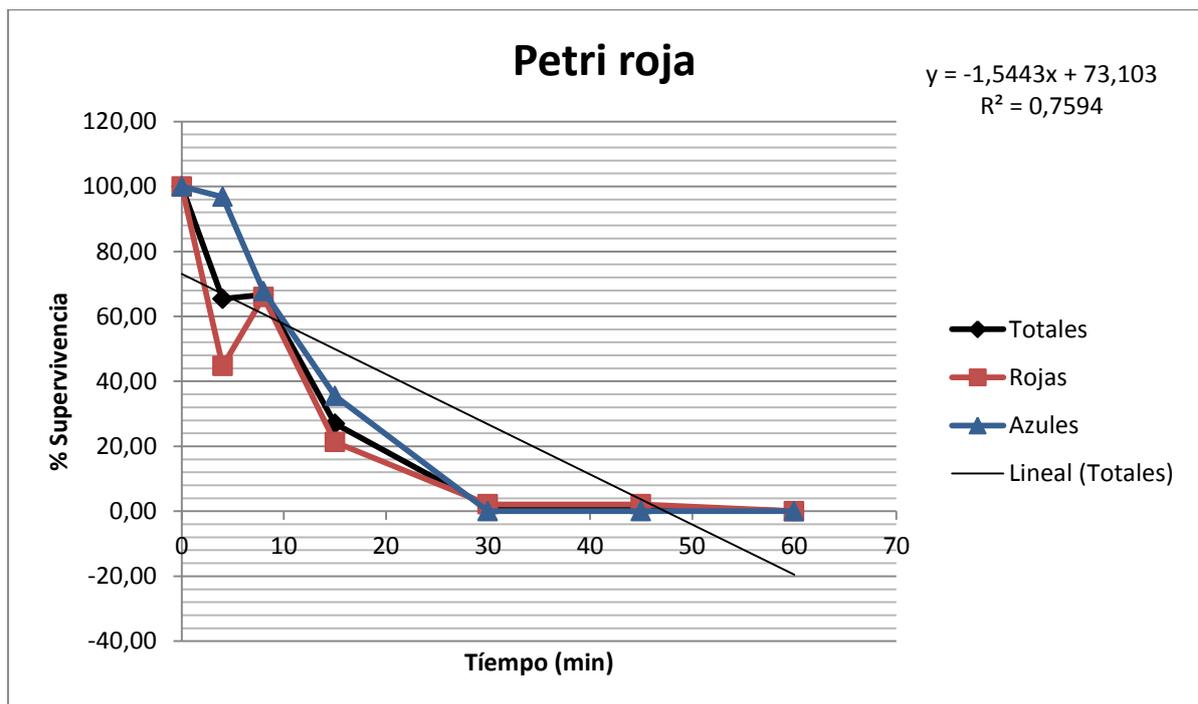


Figura 41. Porcentaje de supervivencia en agar rojo, respecto al tiempo de desinfección. UV-LED 365nm, 8W 10 LEDs.

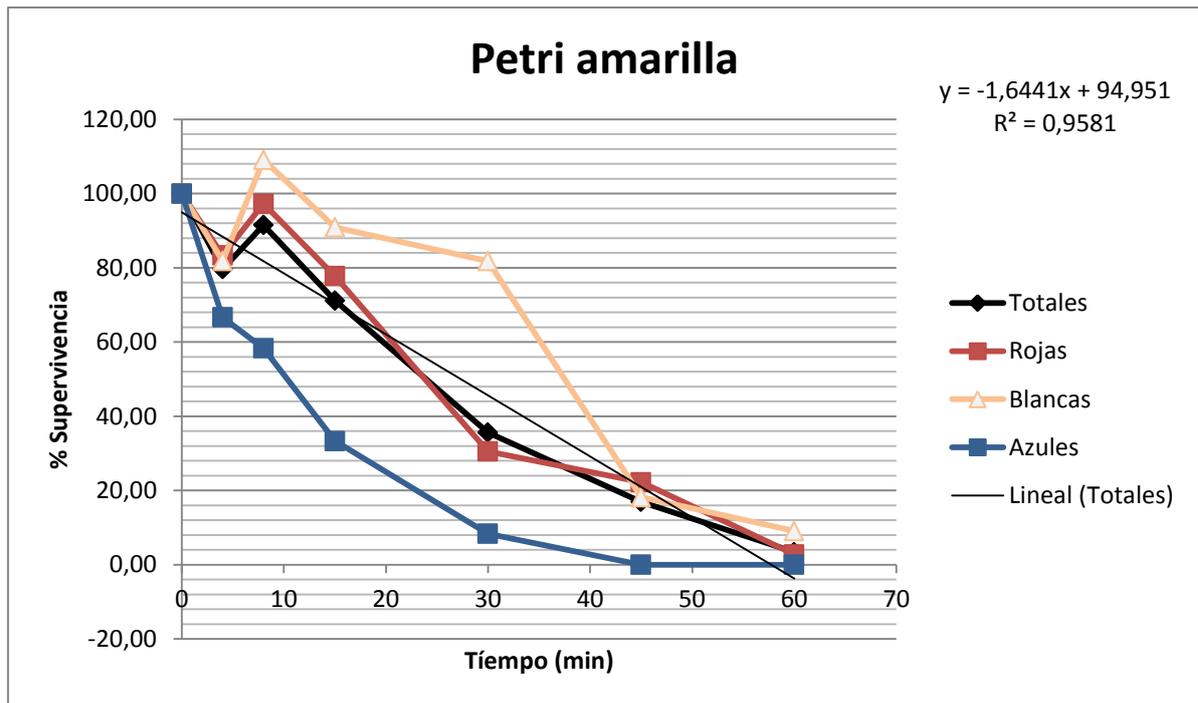


Figura 42. Porcentaje de supervivencia en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. UV-LED 365nm, 8W, 10 LEDs.

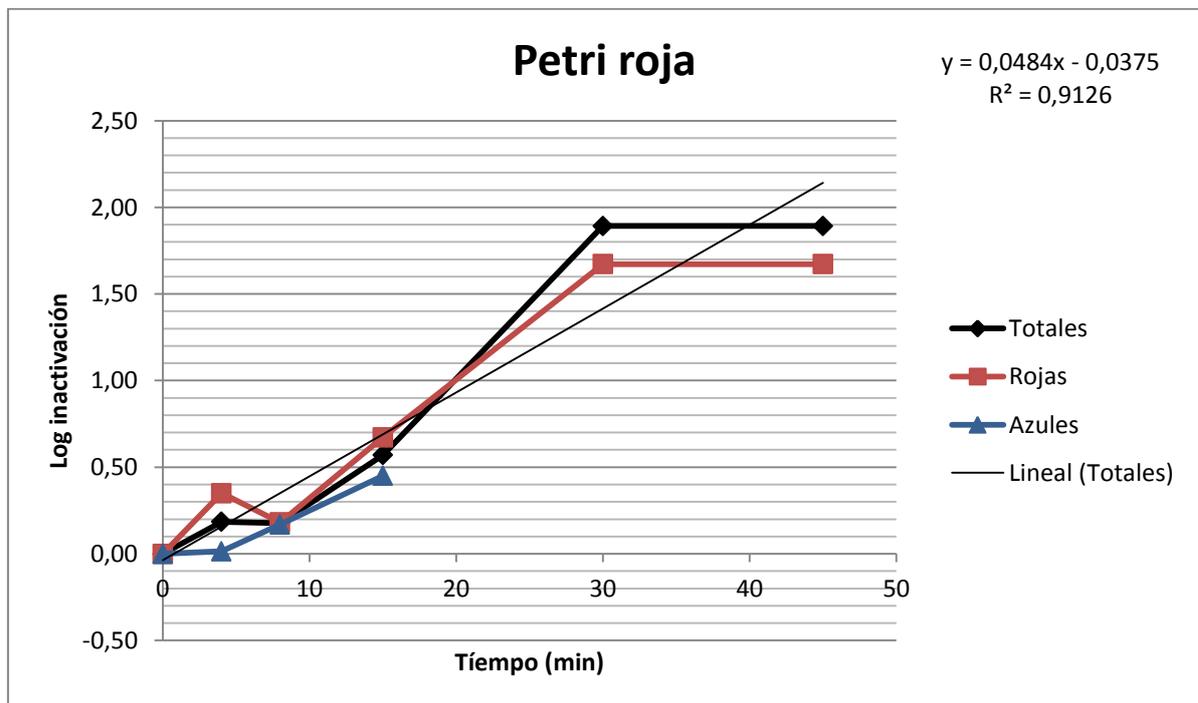


Figura 43. Logaritmo de inactivación en agar rojo, respecto al tiempo de desinfección. UV-LED 365nm, 8W, 10 LEDs.

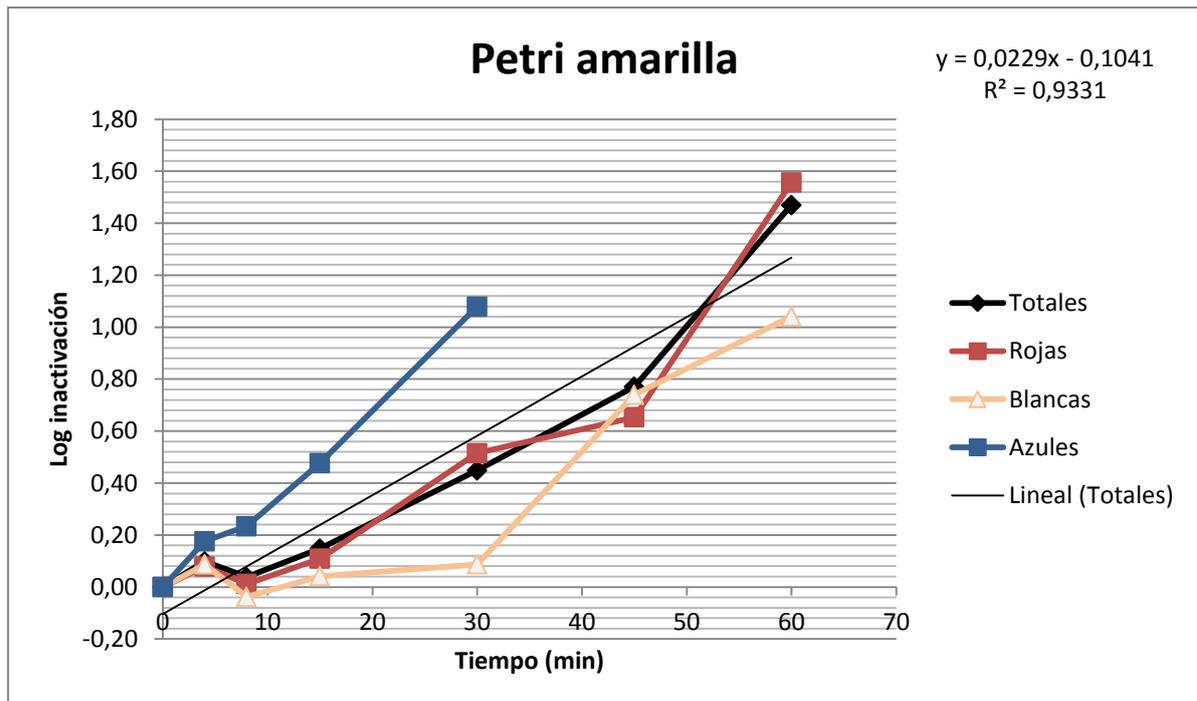


Figura 44. Logaritmo de inactivación en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. UV-LED 365nm, 8W, 10 LEDs.

En las placas Petri con agar m-FC Agar (de color rojo) se observa una mayor inactivación en un menor tiempo que en las placas con agar Chromocult® Coliformes Agar (de color amarillo).

La inactivación completa de *E. aerogenes* se observa en el agar rojo a los 60 min de exposición, y en el amarillo no se consigue la inactivación completa (ver Fig. 43 y 44).

La inactivación completa de *E. coli* se consigue en el agar rojo a los 30 min de exposición y en el agar amarillo a los 45 min de exposición.

- Para la lámpara UV convencional 366nm, 13,5W:

Con la lámpara UV convencional de vapor de mercurio a 366nm de longitud de onda, se logra una menor reducción de bacterias comparado con la lámpara UV-LED de 365nm. En el minuto 60 aparece de media un total de 39,5 UFC en el agar m-FC Agar (de color rojo) (ver Fig. 45), y 74 UFC en el agar Chromocult® Coliformes Agar (de color amarillo) (ver Fig. 46), por lo que el porcentaje de supervivencia total se encuentra en 46,2% y 43,27% para respectivos agares.

REDUCCIÓN DE PATÓGENOS EN AGUA DE CONSUMO Y REUTILIZADAS MEDIANTE APLICACIÓN DE LUZ ULTRAVIOLETA DE BAJO CONSUMO

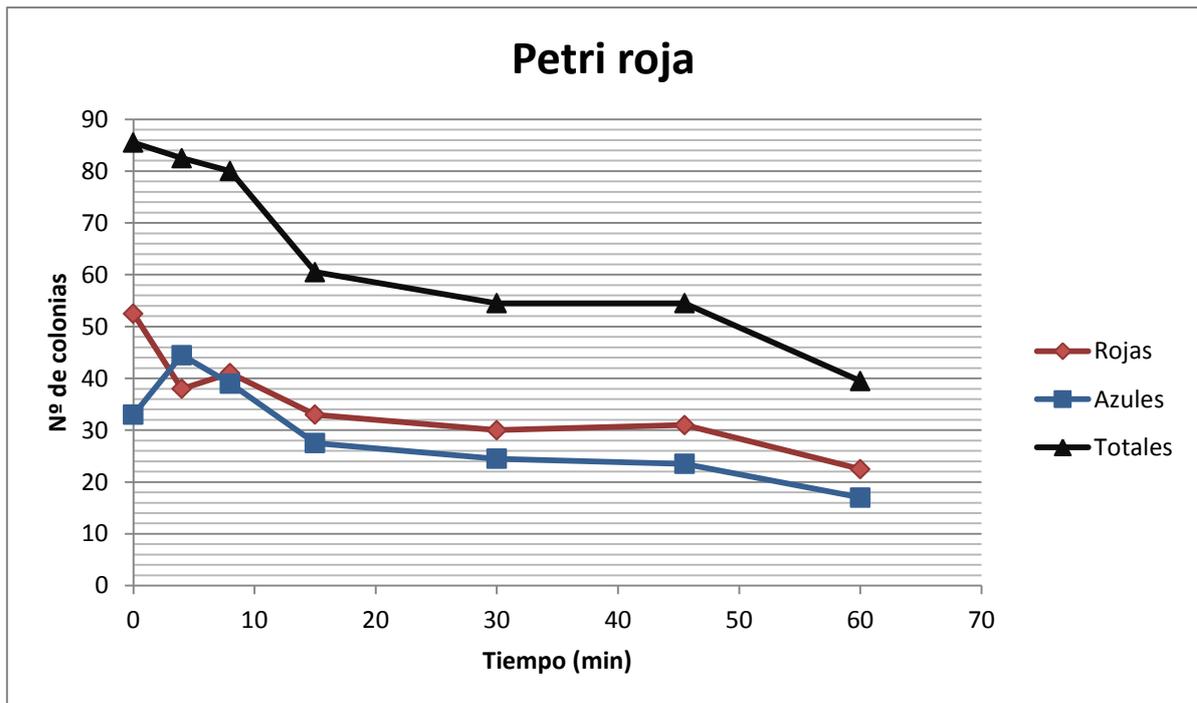


Figura 45. Nº de colonias en agar rojo, respecto al tiempo de desinfección. UV convencional 366nm, 13,5W.

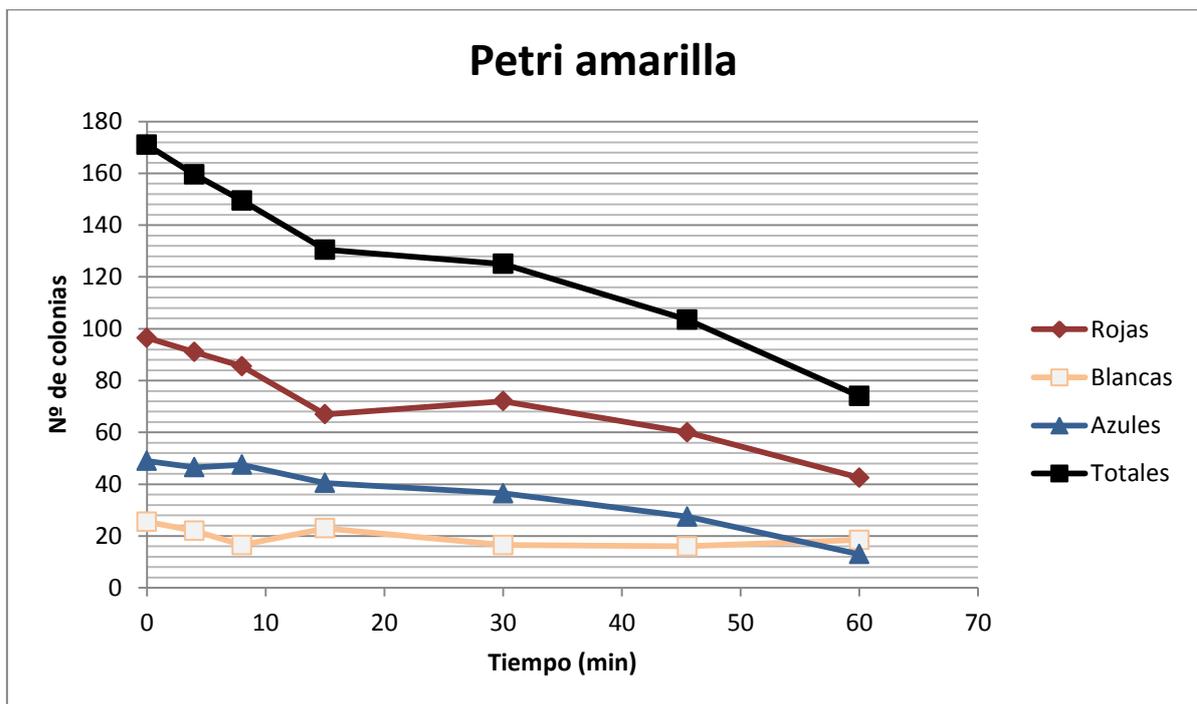


Figura 46. Nº de colonias en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. UV convencional 366nm, 13,5W.

REDUCCIÓN DE PATÓGENOS EN AGUA DE CONSUMO Y REUTILIZADAS MEDIANTE APLICACIÓN DE LUZ ULTRAVIOLETA DE BAJO CONSUMO

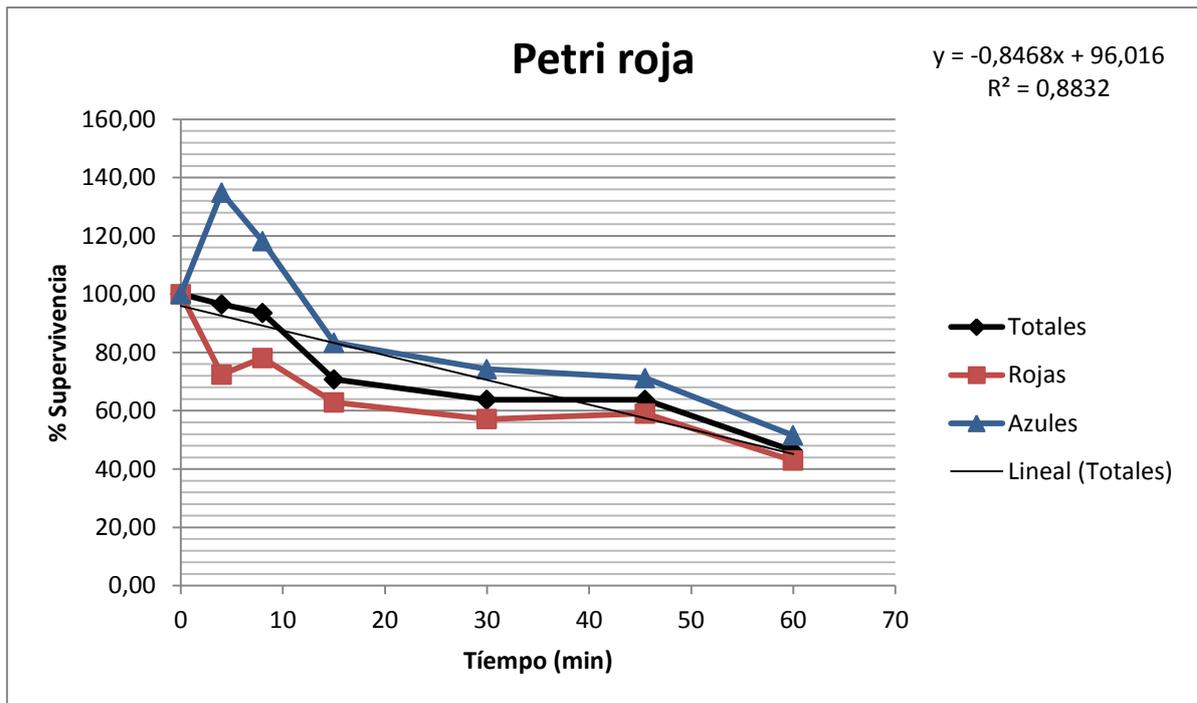


Figura 47. Porcentaje de supervivencia en agar rojo, respecto al tiempo de desinfección. UV convencional 366nm, 13,5W.

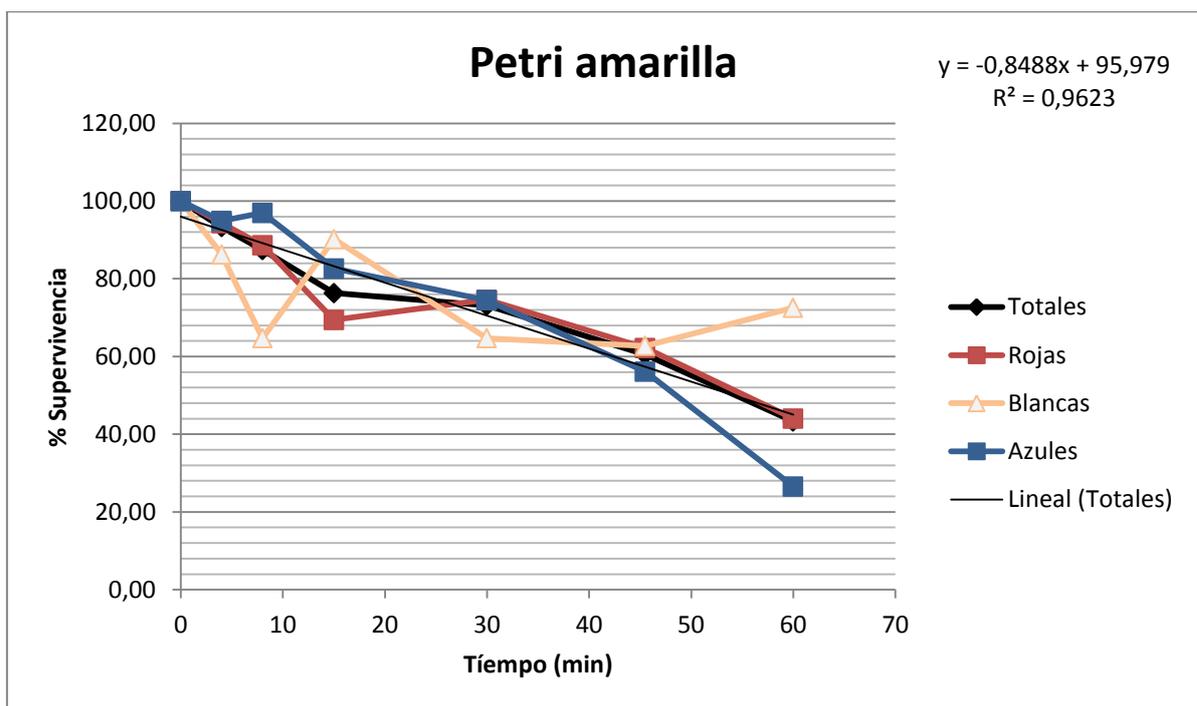


Figura 48. Porcentaje de supervivencia en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. UV convencional 366nm, 13,5W.

REDUCCIÓN DE PATÓGENOS EN AGUA DE CONSUMO Y REUTILIZADAS MEDIANTE APLICACIÓN DE LUZ ULTRAVIOLETA DE BAJO CONSUMO

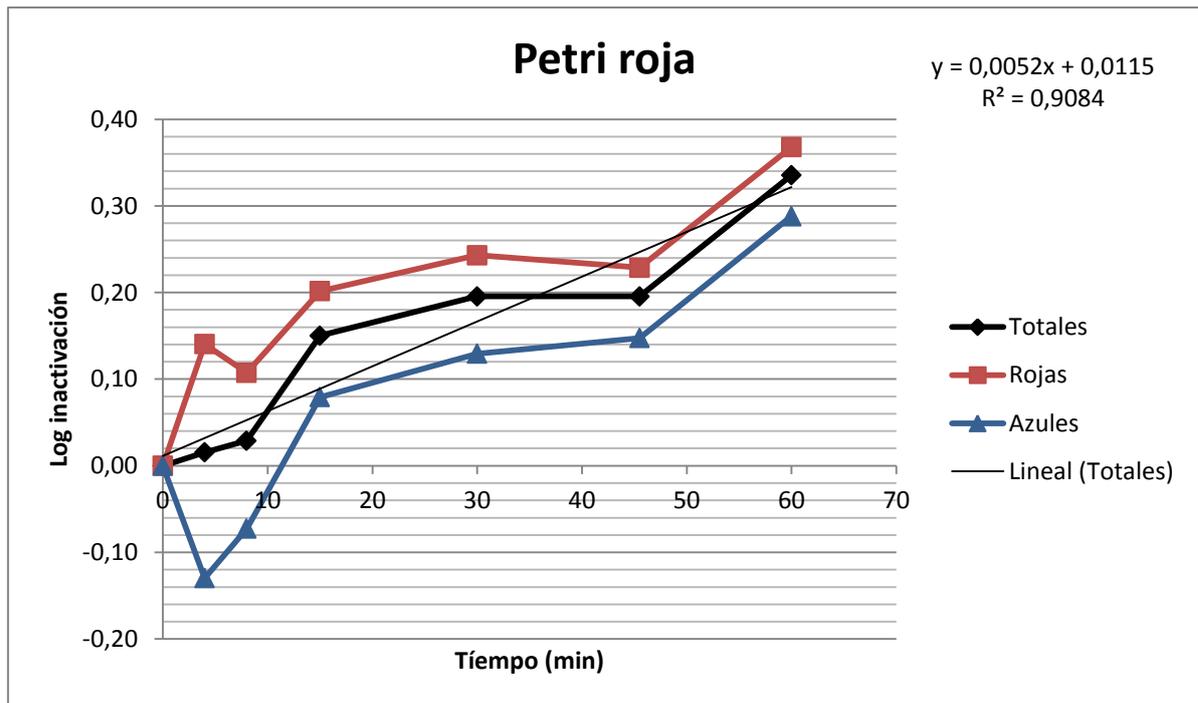


Figura 49. Logaritmo de inactivación en agar rojo, respecto al tiempo de desinfección. UV convencional 366nm, 13,5W.

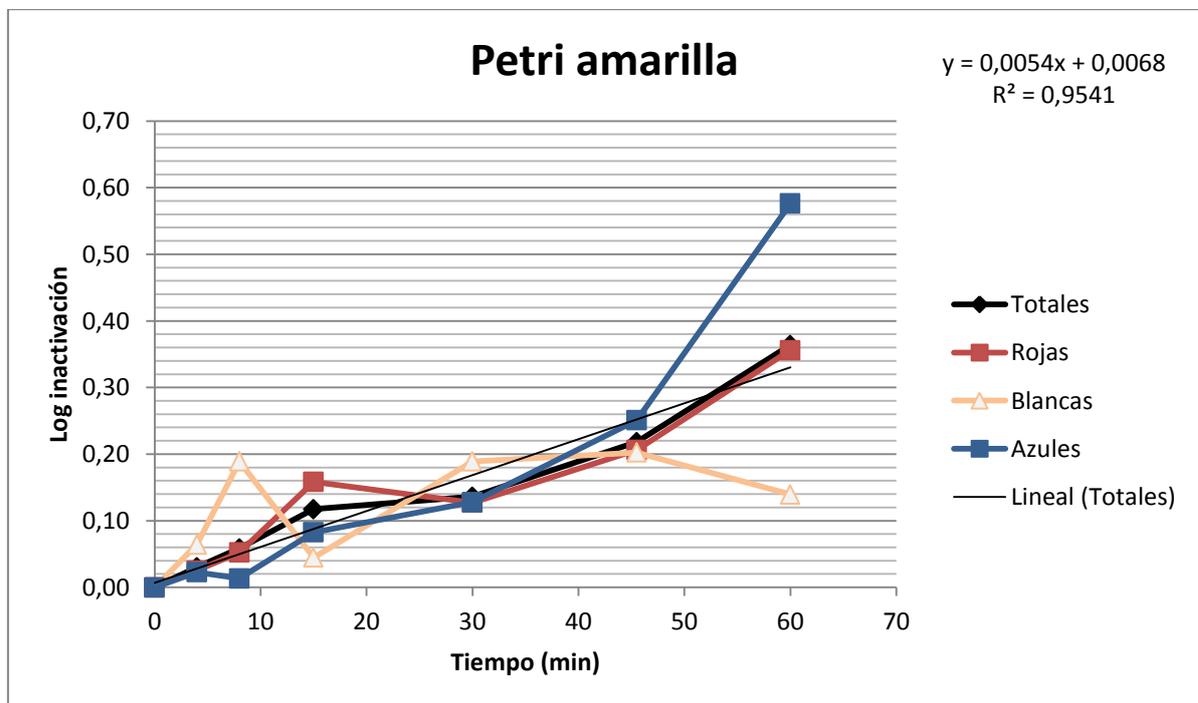


Figura 50. Logaritmo de inactivación en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. UV convencional 366nm, 13,5W.

## REDUCCIÓN DE PATÓGENOS EN AGUA DE CONSUMO Y REUTILIZADAS MEDIANTE APLICACIÓN DE LUZ ULTRAVIOLETA DE BAJO CONSUMO

El logaritmo de inactivación en el minuto 60 para *E.coli* y *E.aerogenes* en el agar rojo es de 0,29 y 0,37 respectivamente (ver Fig. 49) y en el agar amarillo el log de inactivación es de 0,58 y 0,36 respectivamente (ver Fig. 50).

Con la lámpara UV convencional de 366 nm de vapor de mercurio no se alcanza la desinfección total de la muestra de agua en 60 min de irradiación. Sin embargo, con la lámpara UV-LED 365 nm sí que se alcanza la desinfección completa.

- Para la lámpara UV convencional 254 nm, 13,5W:

Tras realizar varios ensayos se observó que los resultados obtenidos con las placas Petri Chromocult® Coliformes Agar (de color amarillo) eran similares a los de las placas Petri m-FC Agar (de color rojo).

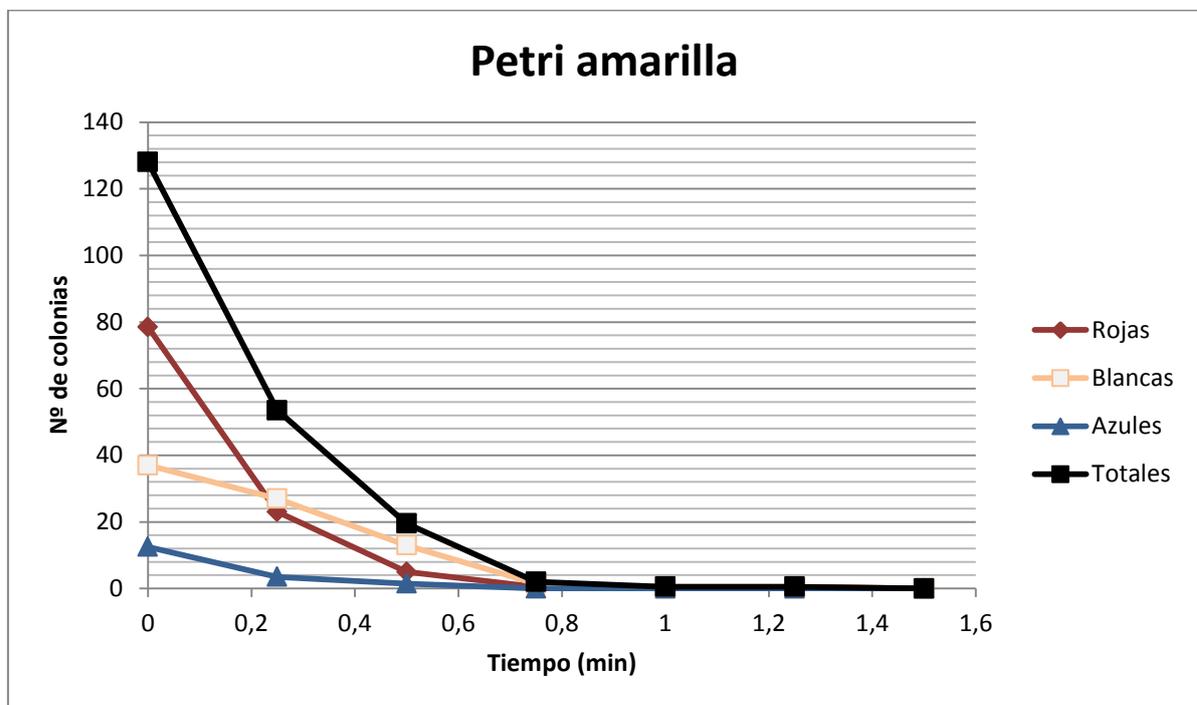


Figura 51. Nº de colonias en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. UV convencional 254nm, 13,5W.

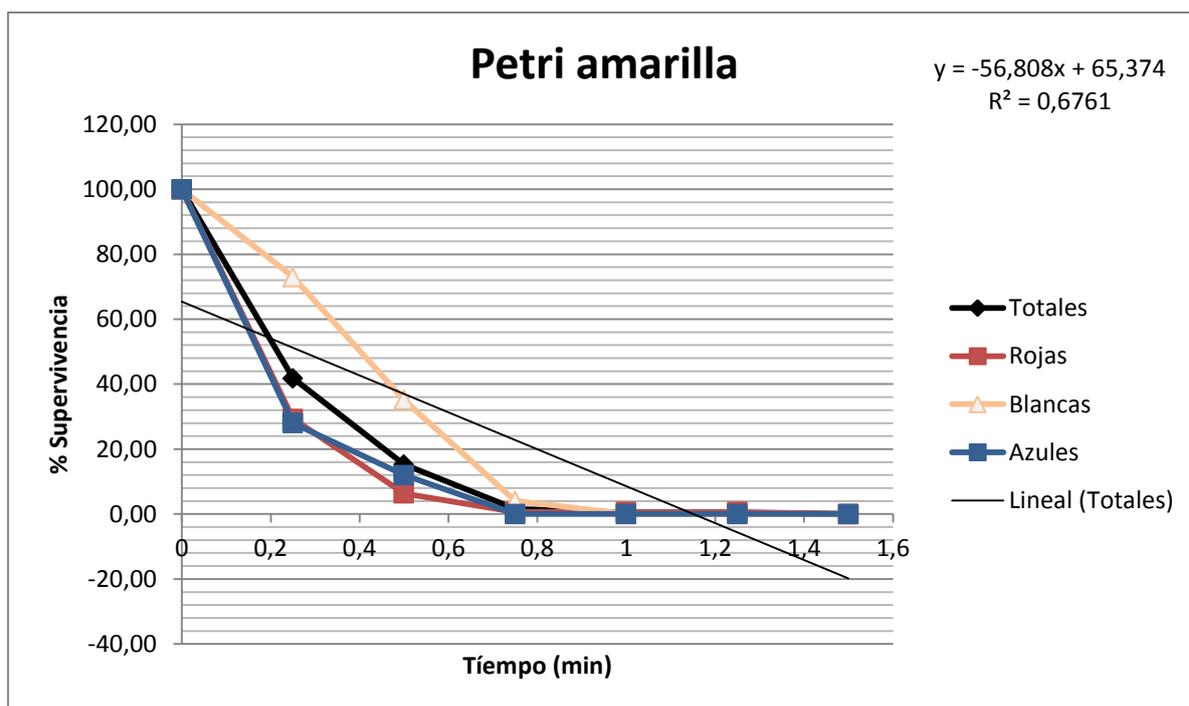


Figura 52. Porcentaje de supervivencia en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. UV convencional 254nm, 13,5W.

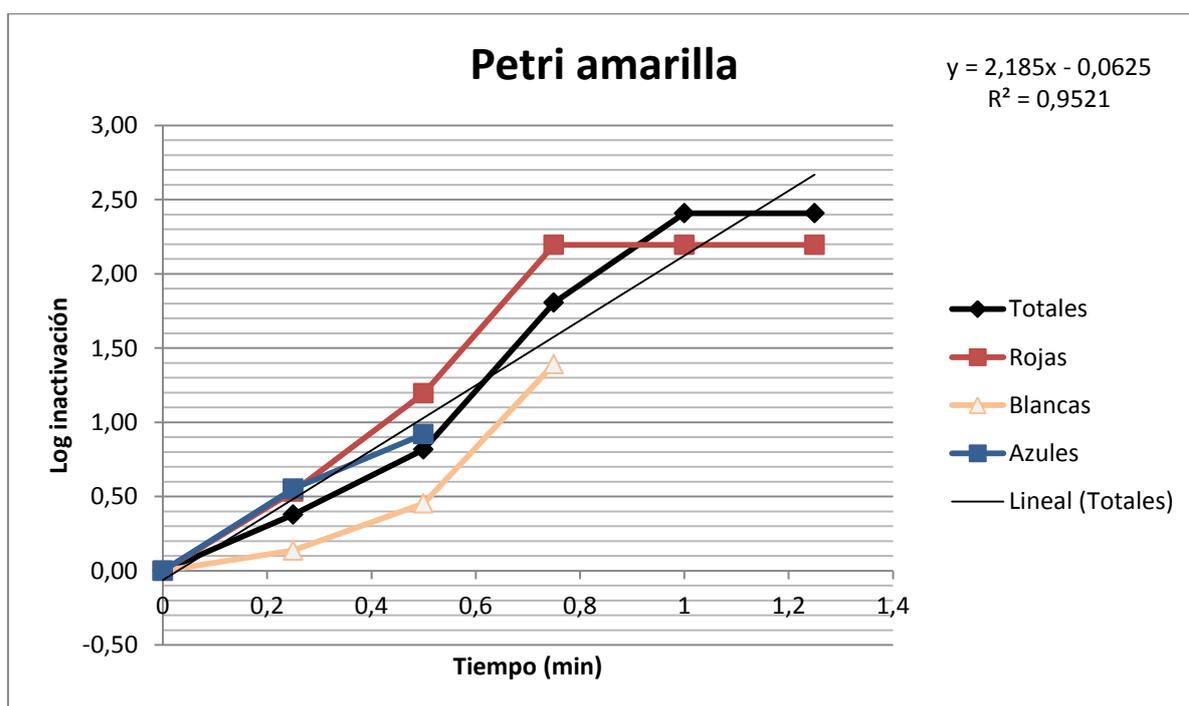


Figura 53. Logaritmo de inactivación en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. UV convencional 254nm, 13,5W.

Con la lámpara UV convencional, de vapor de mercurio, a 254nm de longitud de onda, se logra una desinfección completa de bacterias totales a los 1,5 min de comenzar la prueba de irradiación. Para *E.coli* se consigue una inactivación completa en 0.75 min. Para *K. pneumoniae*, *E. aerogenes* y *C. freundii* se alcanza una inactivación completa en 1,5 min. Y para

## REDUCCIÓN DE PATÓGENOS EN AGUA DE CONSUMO Y REUTILIZADAS MEDIANTE APLICACIÓN DE LUZ ULTRAVIOLETA DE BAJO CONSUMO

las especies de bacterias no coliformes (*E. faecalis* y *P. aeruginosa*) alcanzamos la inactivación completa en 1 minuto de irradiación.

- Para la lámpara UV-LED 365nm, 13.5W (8 LEDs):

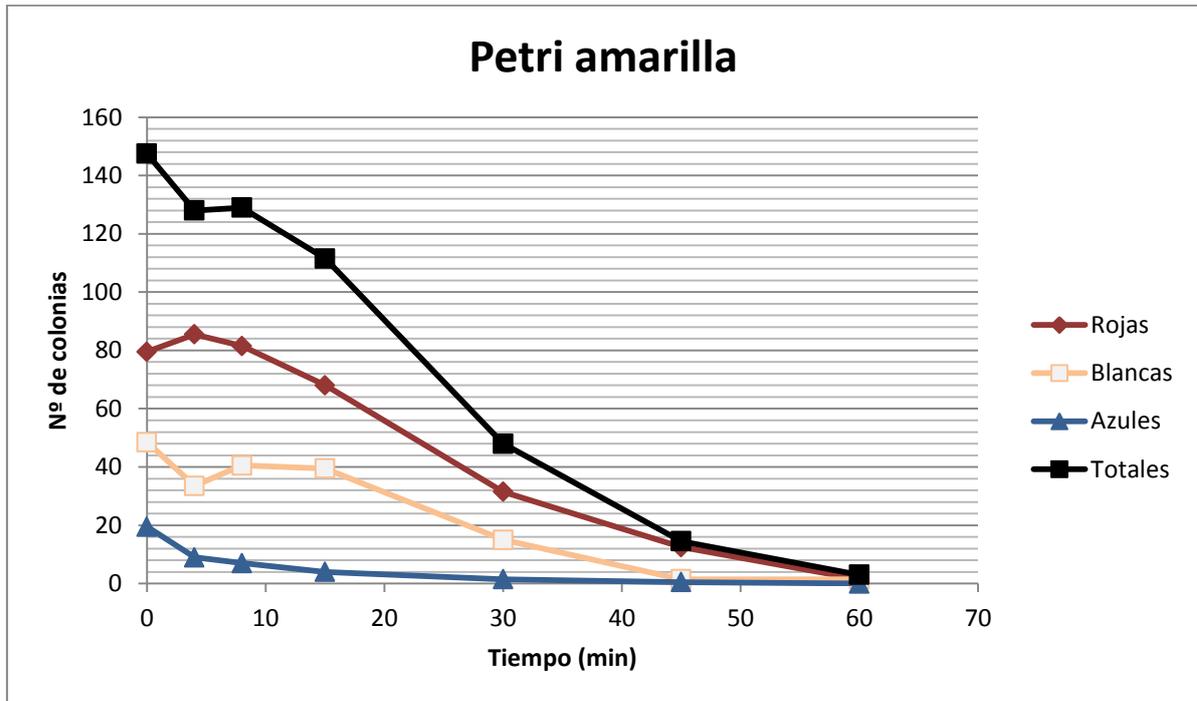


Figura 54. Nº de colonias en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. UV-LED 365nm, 13,5W.

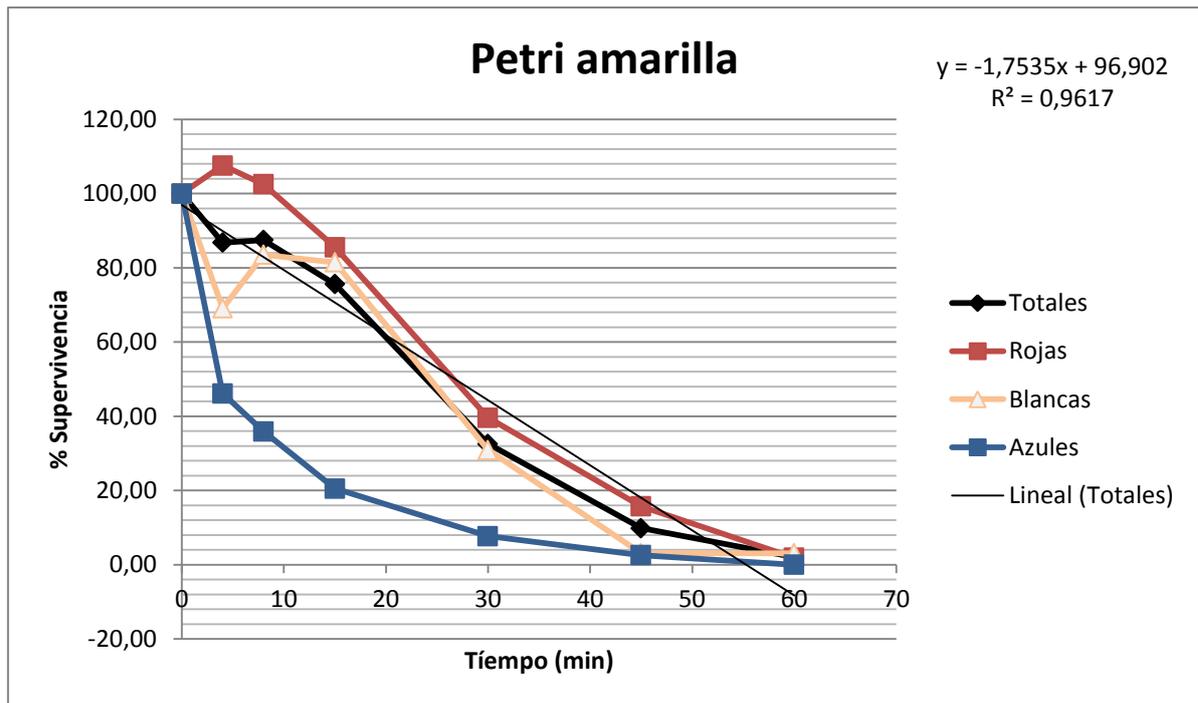


Figura 55. Porcentaje de supervivencia en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. UV-LED 365nm, 13,5W.

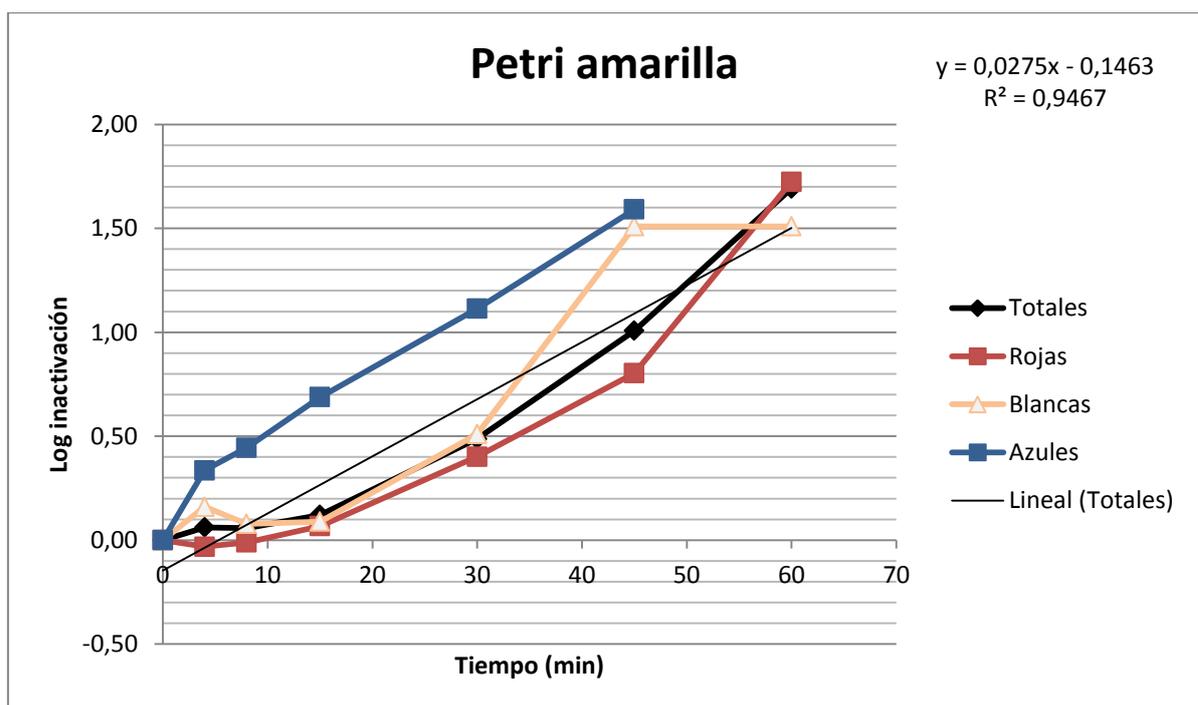


Figura 56. Logaritmo de inactivación en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. UV-LED 365nm, 13,5W.

Con la lámpara UV-LED de 365 nm de longitud de onda a una potencia de 13,5W, se logra una desinfección total de *E.coli* en 60 minutos de irradiación. El logaritmo de inactivación de *K. pneumoniae*, *E. aerogenes* y *C. freundii* en el minuto 60 es de 1,72 y el logaritmo de inactivación de las especies de bacterias no coliformes (*E. faecalis* y *P. aeruginosa*) es de 1,51.

REDUCCIÓN DE PATÓGENOS EN AGUA DE CONSUMO Y REUTILIZADAS MEDIANTE APLICACIÓN DE LUZ ULTRAVIOLETA DE BAJO CONSUMO

- Para la lámpara UV-LED 385 nm, 8W:

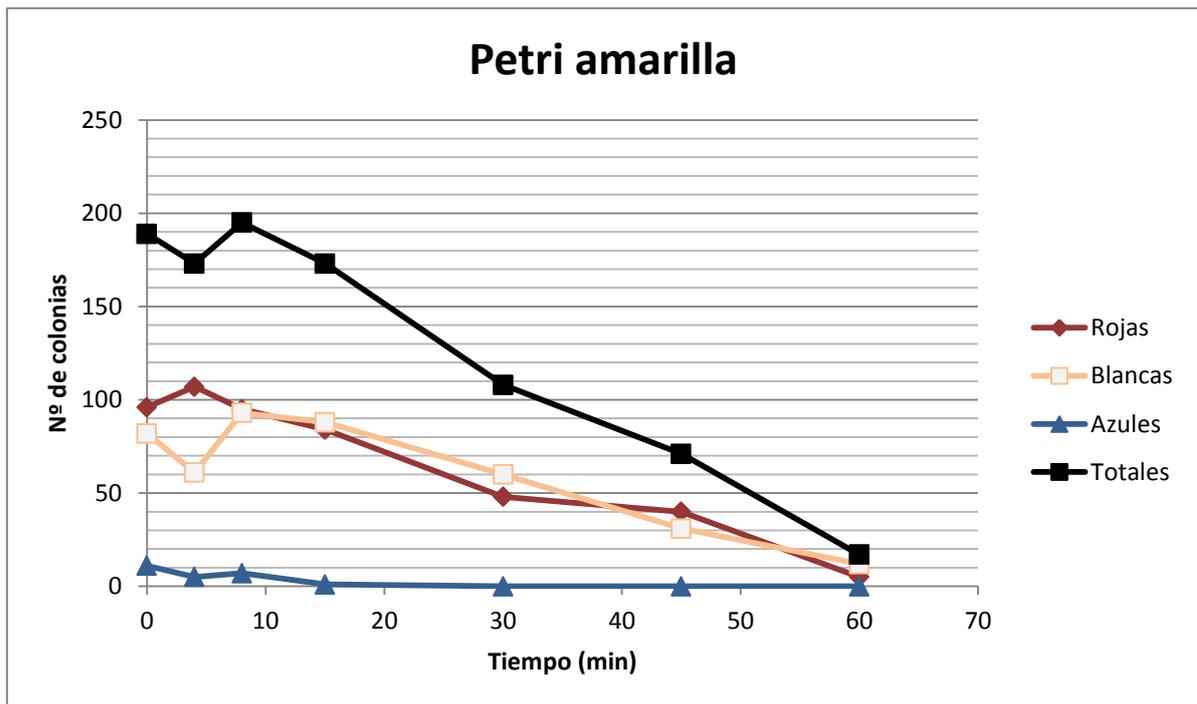


Figura 57. Nº de colonias en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. UV-LED 385nm, 8W.

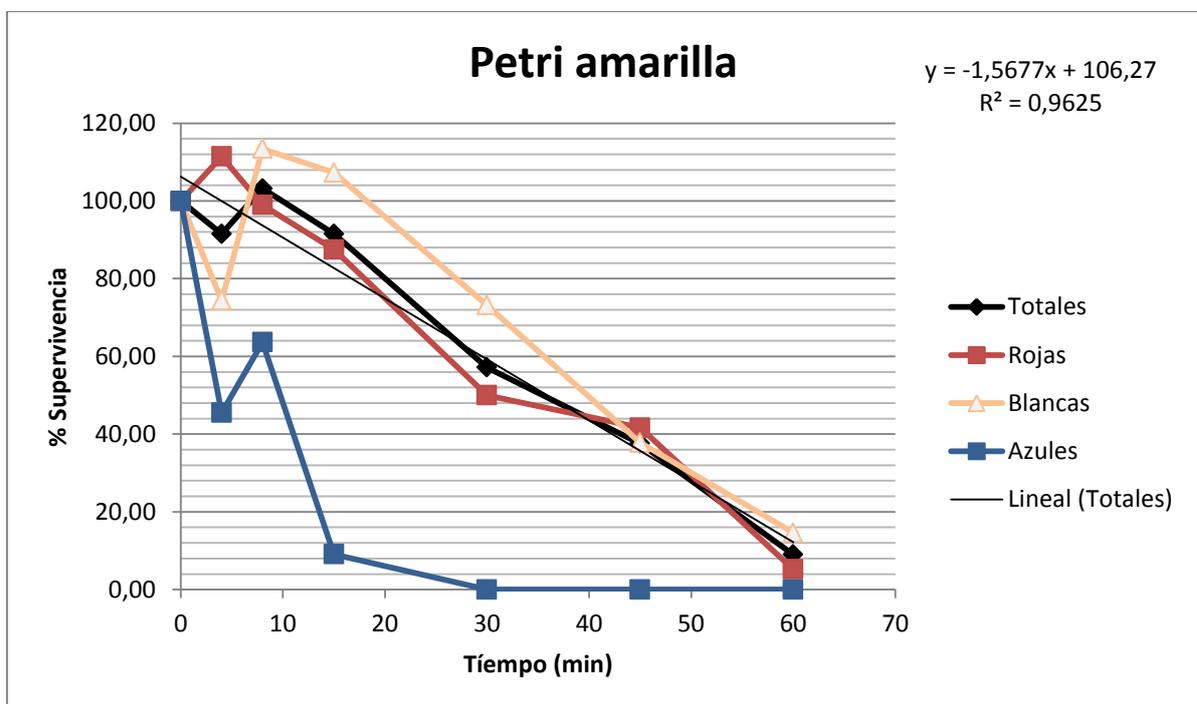


Figura 58. Porcentaje de supervivencia en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. UV-LED 385nm, 8W.

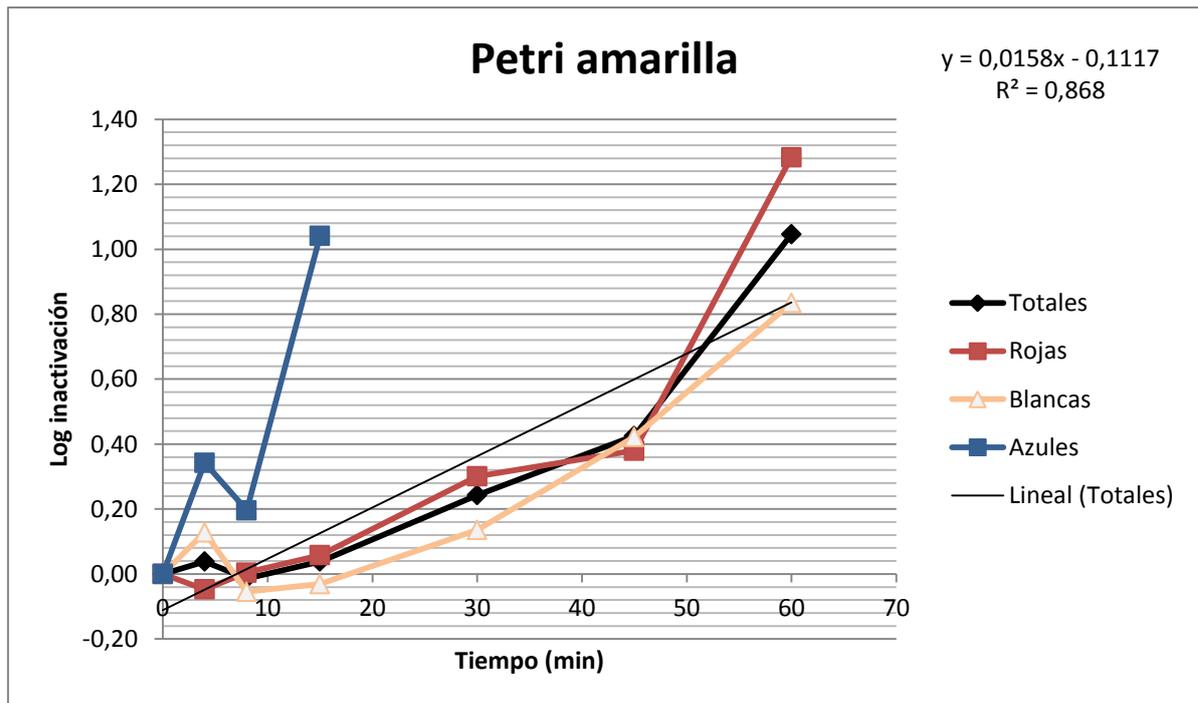


Figura 59. Logaritmo de inactivación en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. UV-LED 385nm, 8W.

Con la lámpara UV-LED de 385nm de longitud de onda a una potencia de 8W se alcanza una desinfección total de *E.coli* en 30 minutos de irradiación. El logaritmo de inactivación de *K. pneumoniae*, *E. aerogenes* y *C. freundii* en el minuto 60 es de 1,28 y el logaritmo de inactivación de las especies de bacterias no coliformes (*E. faecalis* y *P. aeruginosa*) es de 0,83. En definitiva, el logaritmo de inactivación de bacterias totales es de 1,05 en el minuto 60, menor que el de la lámpara UV-LED 365 a 8W de potencia, el cual fue de 1,47.

REDUCCIÓN DE PATÓGENOS EN AGUA DE CONSUMO Y REUTILIZADAS MEDIANTE APLICACIÓN DE LUZ ULTRAVIOLETA DE BAJO CONSUMO

- Para la lámpara UV-LED 395 nm, 8W:

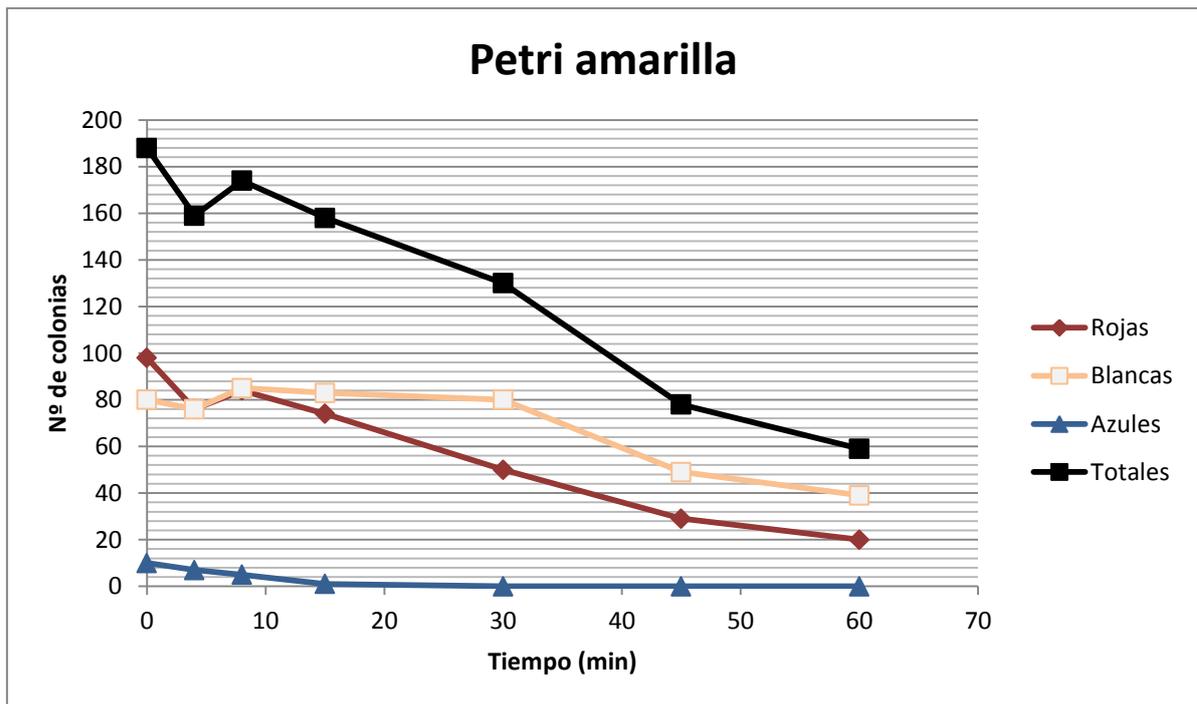


Figura 60. Nº de colonias en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. UV-LED 395nm, 8W.

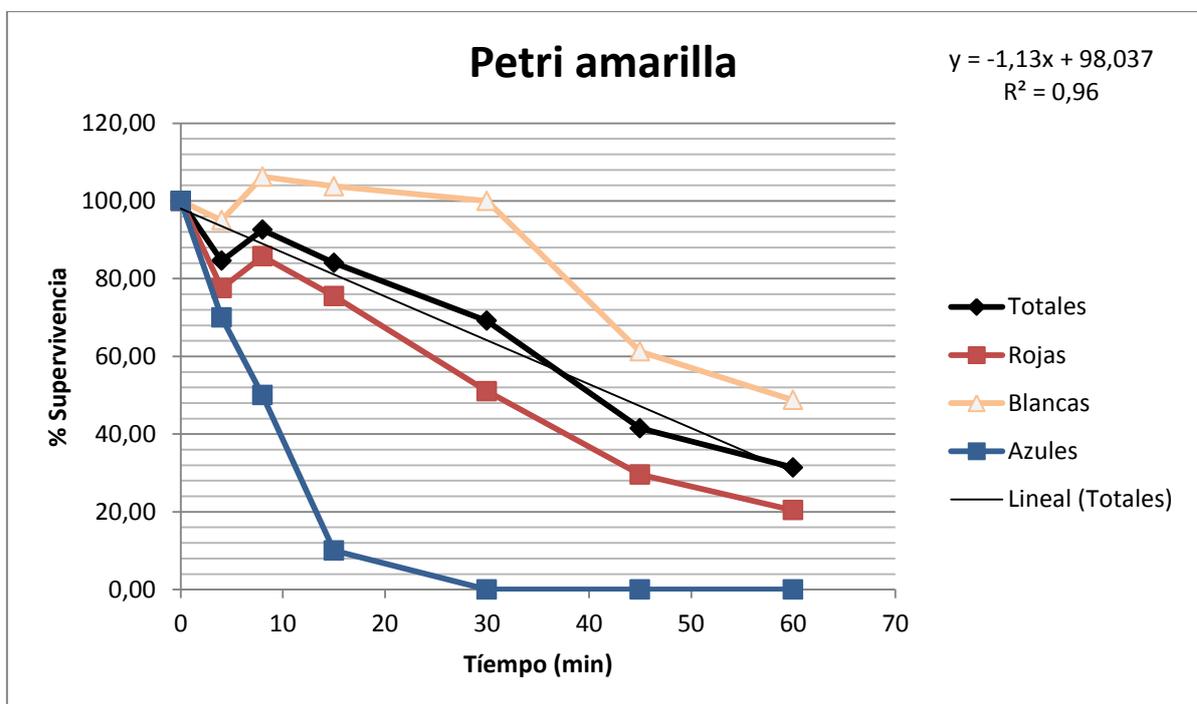


Figura 61. Porcentaje de supervivencia en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. UV-LED 395nm, 8W.

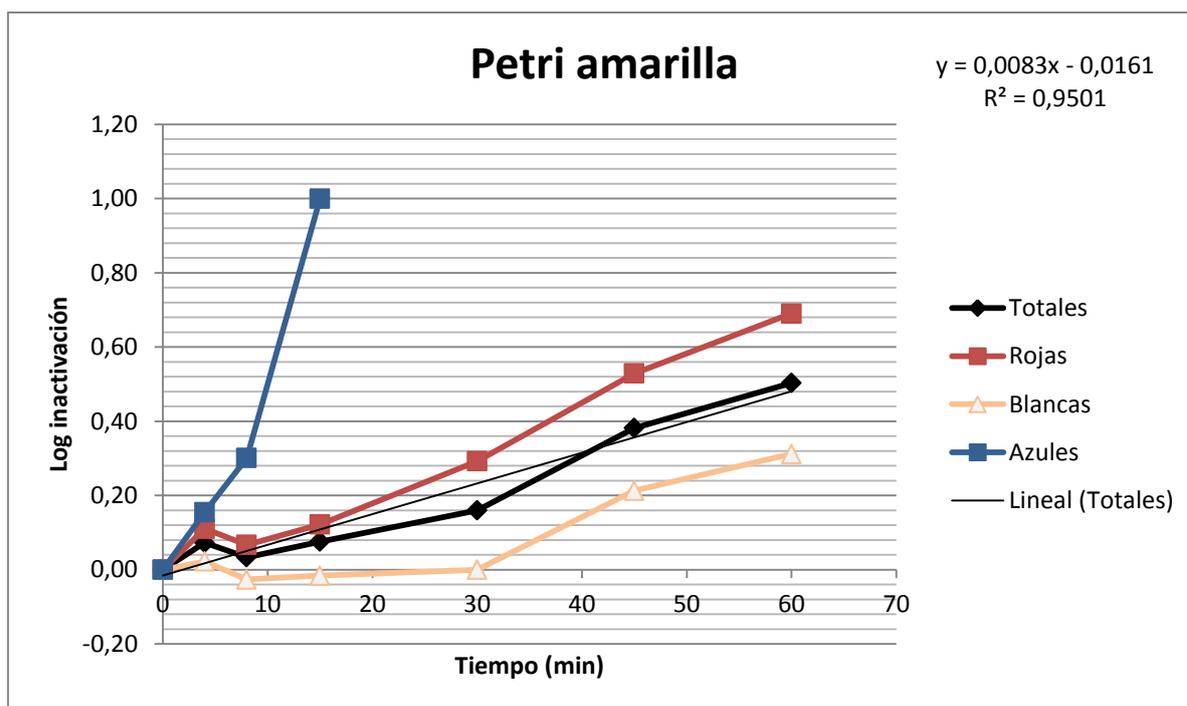


Figura 62. Logaritmo de inactivación en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. UV-LED 395nm, 8W.

Con la lámpara UV-LED de 395 nm de longitud de onda a una potencia de 8W se logra una desinfección total de *E.coli* en 30 minutos de irradiación. El logaritmo de inactivación de *K. pneumoniae*, *E. aerogenes* y *C. freundii* en el minuto 60 es de 0,69 y el logaritmo de inactivación de las especies de bacterias no coliformes (*E. faecalis* y *P. aeruginosa*) es de 0,31. El logaritmo de inactivación de bacterias totales es de 0,50 en el minuto 60, por consiguiente, menor que el de la lámpara UV-LED 385 a 8W de potencia, el cual fue de 1,05.

- Para la lámpara UV-LED 385nm, 8W más 0,01 g de TiO<sub>2</sub>:

Durante el proceso de irradiación con luz ultravioleta añadimos 0,01g de TiO<sub>2</sub> en el agua a tratar; de esta forma mejora la eficiencia de desinfección.

Al añadir el catalizador TiO<sub>2</sub> al agua contaminada, con la lámpara UV-LED de 385 nm de longitud de onda a una potencia de 8W, no se consigue la desinfección total para *E.coli* en el minuto 60 de irradiación. El logaritmo de inactivación de *K. pneumoniae*, *E. aerogenes* y *C. freundii* en el minuto 60 es de 1,79 y el logaritmo de inactivación para las especies de bacterias no coliformes (*E. faecalis* y *P. aeruginosa*) es de 1,67. El logaritmo de inactivación de bacterias totales es de 1,70 en el minuto 60, este valor es mayor que en el ensayo con la misma lámpara sin catalizador, que fue de 1,05.

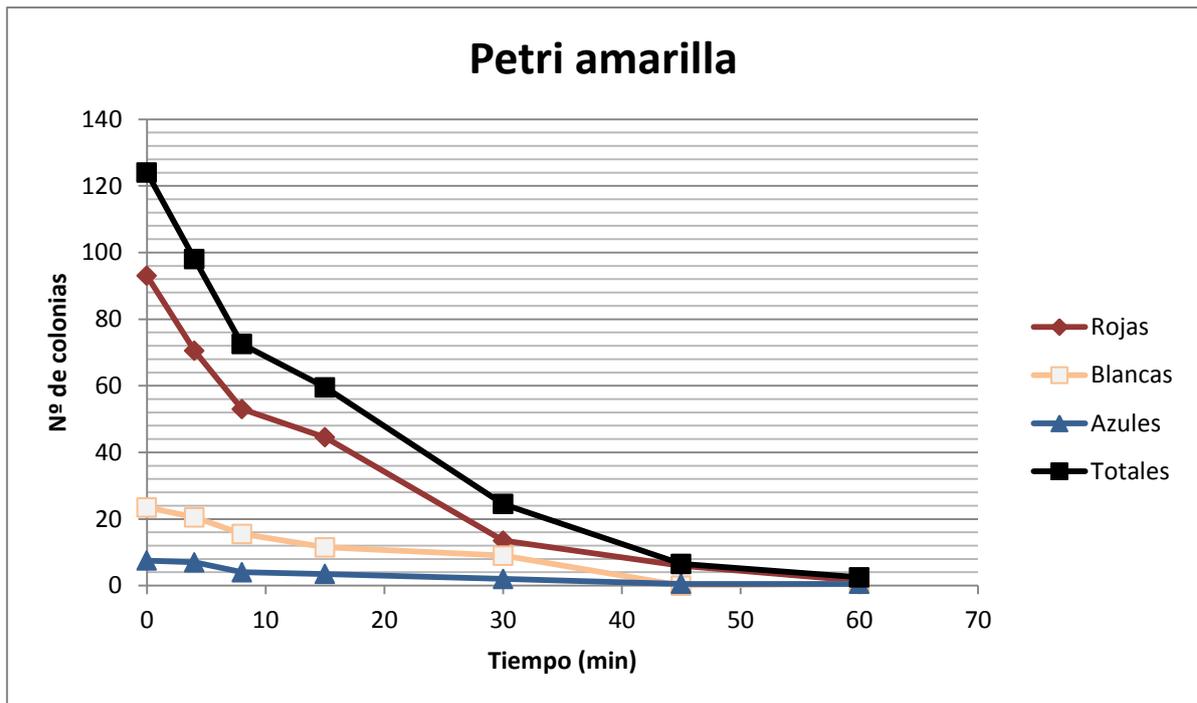


Figura 63. Nº de colonias en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. UV-LED 385nm, 8W. 0,01g TiO<sub>2</sub>.

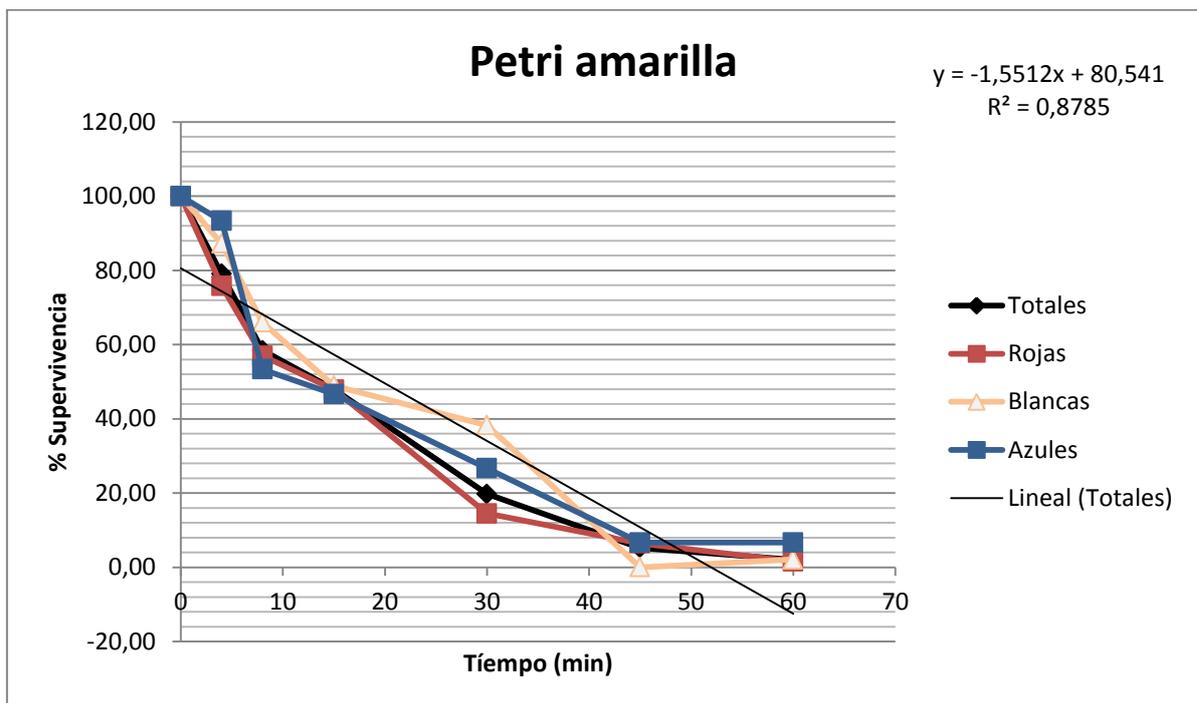


Figura 64. Porcentaje de supervivencia en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. UV-LED 385nm, 8W. 0,01g TiO<sub>2</sub>.

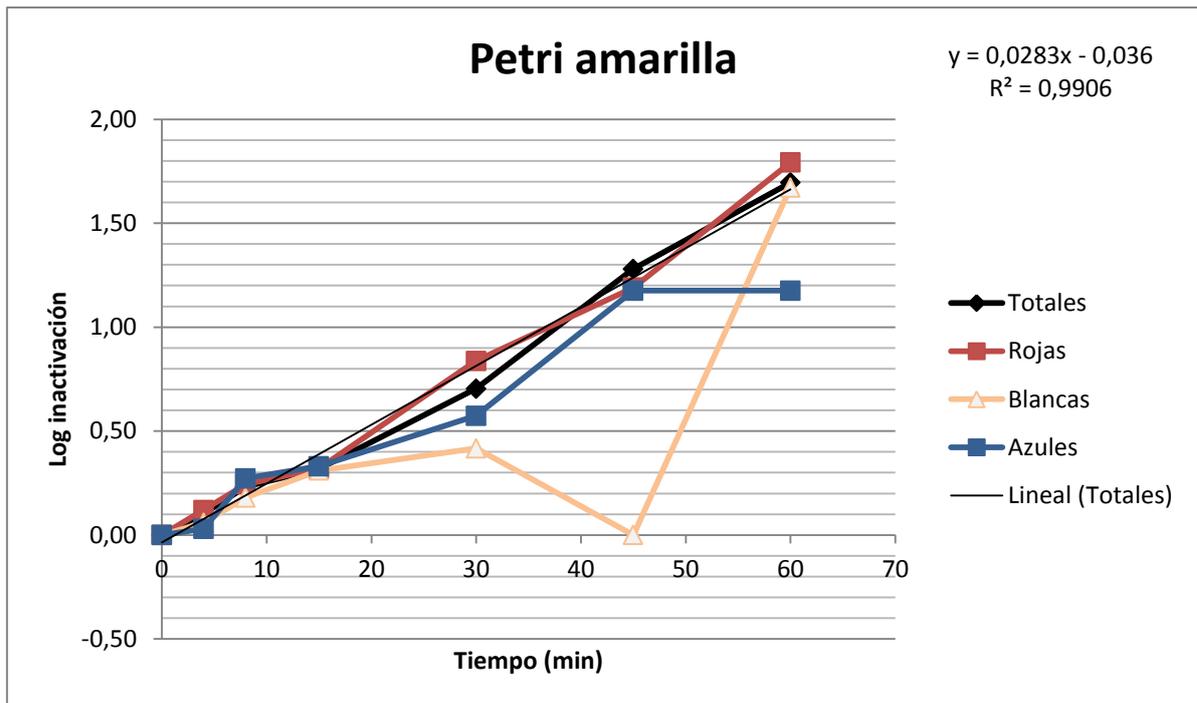


Figura 65. Logaritmo de inactivación en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. UV-LED 385nm, 8W. 0,01g TiO<sub>2</sub>.

- Para la lámpara LED visible, 29,25W:

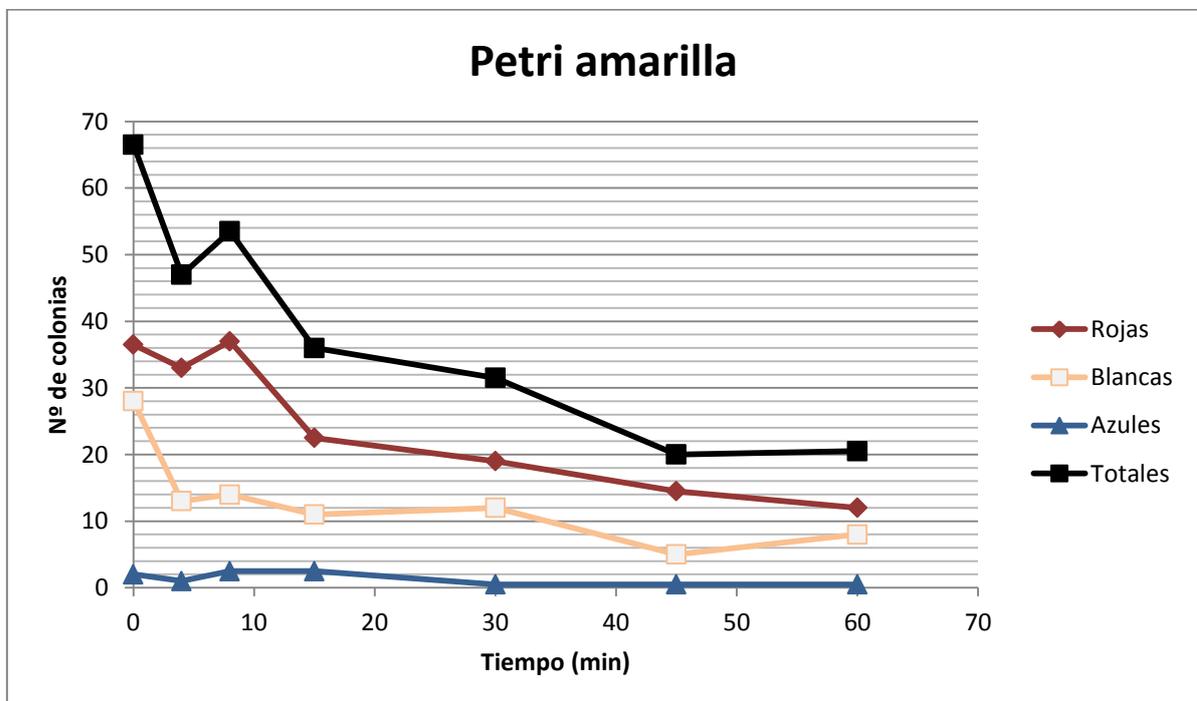


Figura 66. Nº de colonias en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. LED visible, 29,25W.

REDUCCIÓN DE PATÓGENOS EN AGUA DE CONSUMO Y REUTILIZADAS MEDIANTE APLICACIÓN DE LUZ ULTRAVIOLETA DE BAJO CONSUMO

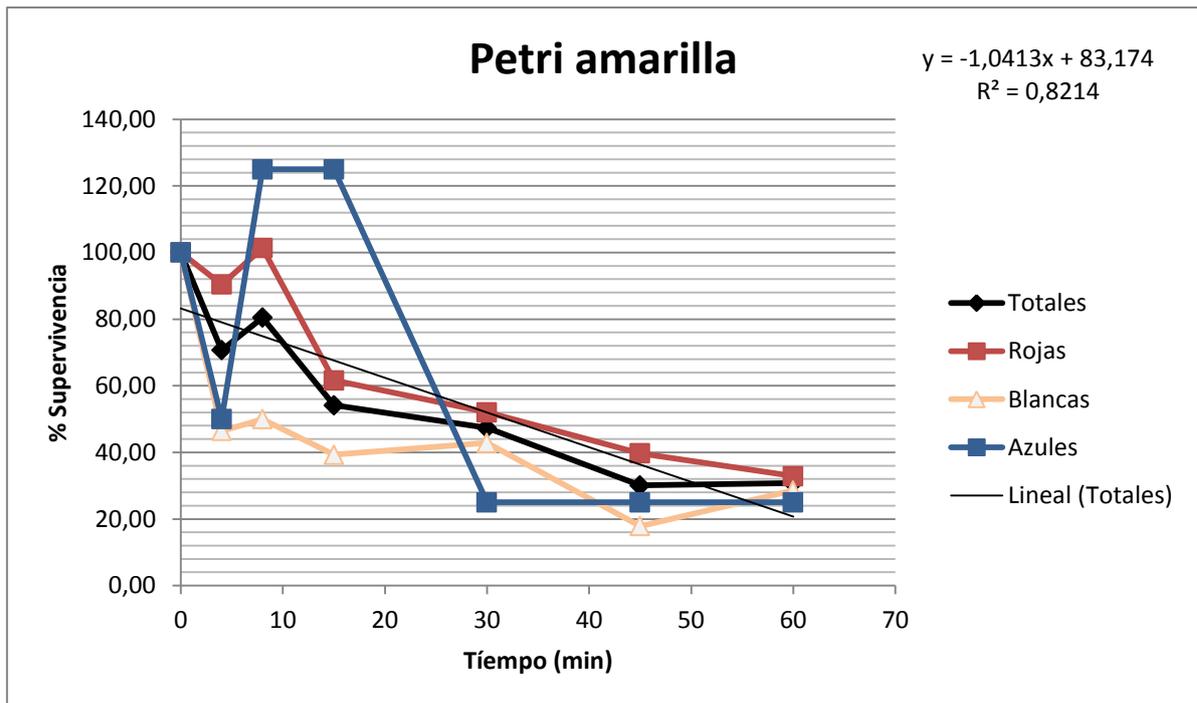


Figura 67. Porcentaje de supervivencia en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. LED visible, 29,25W.

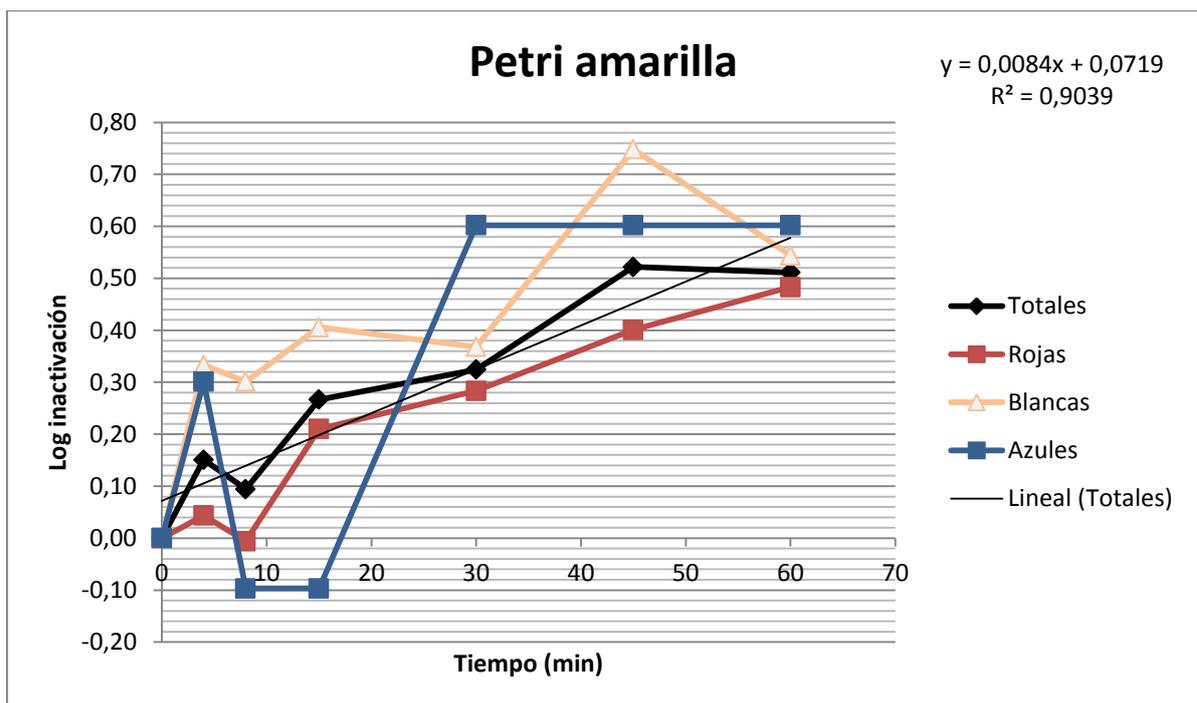


Figura 68. Logaritmo de inactivación en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. LED visible, 29,25W.

Con la lámpara LED visible sin catalizador no se consigue la eliminación total de bacterias *E. coli* en el minuto 60 de irradiación. El logaritmo de inactivación de *K. pneumoniae*, *E. aerogenes* y *C. freundii* en el minuto 60 es de 0,48 y el logaritmo de inactivación en el mismo minuto para las especies de bacterias no coliformes (*E. faecalis* y *P. aeruginosa*) es de 0,54. El logaritmo de inactivación de las bacterias totales es de 0,51 en el minuto 60.

REDUCCIÓN DE PATÓGENOS EN AGUA DE CONSUMO Y REUTILIZADAS MEDIANTE APLICACIÓN DE LUZ ULTRAVIOLETA DE BAJO CONSUMO

- Para la lámpara UV-LED 395nm, 8W. 0,01g TiO<sub>2</sub>:

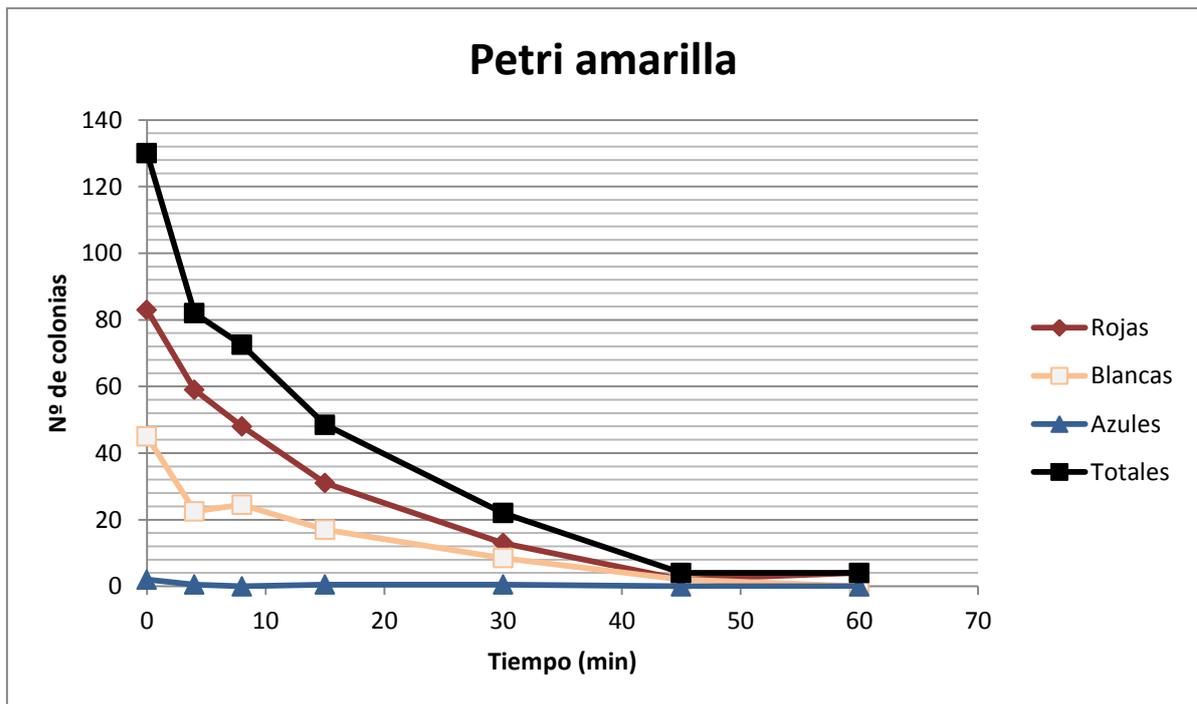


Figura 69. Nº de colonias en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. UV-LED 395nm, 8W. 0,01g TiO<sub>2</sub>.

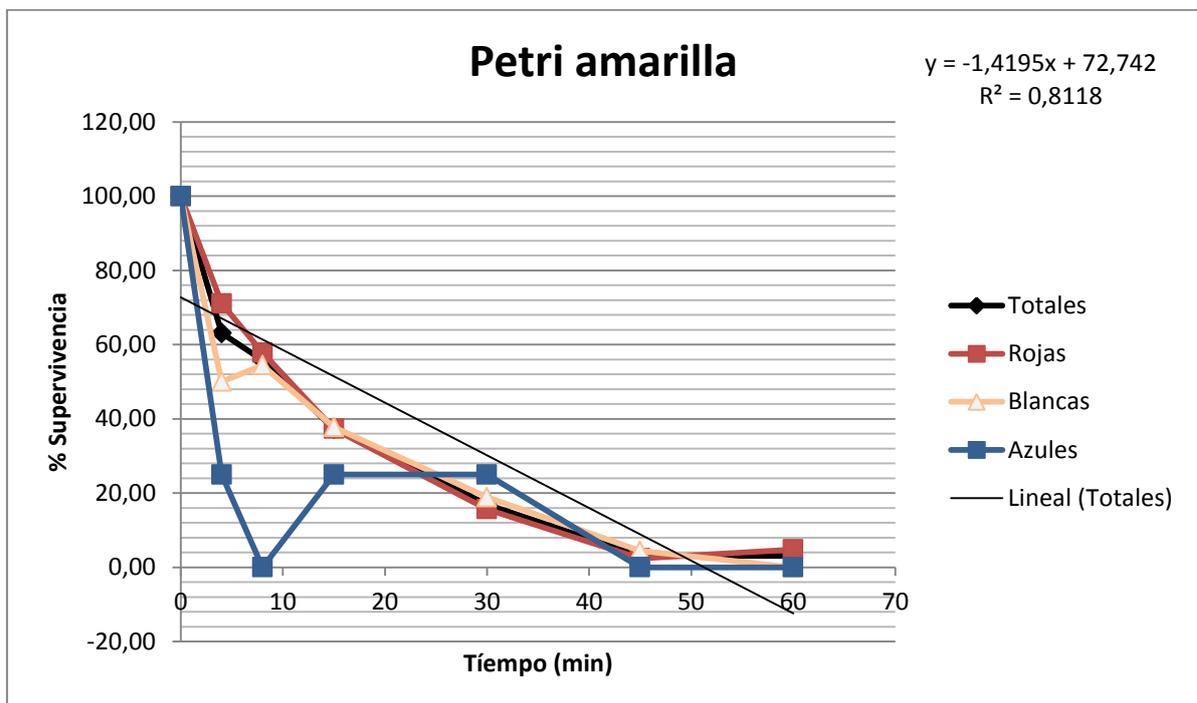


Figura 70. Porcentaje de supervivencia en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. UV-LED 395nm, 8W. 0,01g TiO<sub>2</sub>.

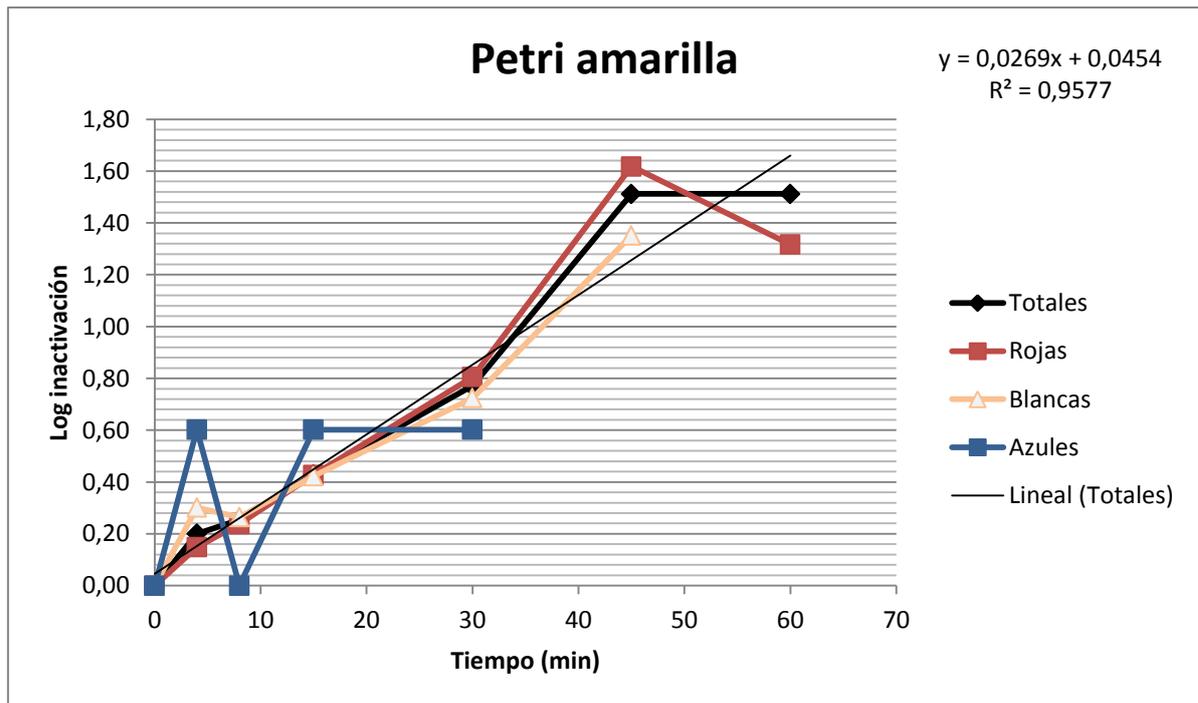


Figura 71. Logaritmo de inactivación en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. UV-LED 395nm, 8W. 0,01g TiO<sub>2</sub>.

Al desinfectar con la lámpara UV-LED 395 nm a 8W con el catalizador TiO<sub>2</sub> (0,01 g) en el agua contaminada se consigue la eliminación total de coliformes en el minuto 45 de irradiación. El logaritmo de inactivación de *K. pneumoniae*, *E. aerogenes* y *C. freundii* en el minuto 60 es de 1,32 y el logaritmo de inactivación en el minuto 45 para las especies de bacterias no coliformes (*E. faecalis* y *P. aeruginosa*) es de 1,35. El logaritmo de inactivación de bacterias totales es de 1,51 en el minuto 60.

REDUCCIÓN DE PATÓGENOS EN AGUA DE CONSUMO Y REUTILIZADAS MEDIANTE APLICACIÓN DE LUZ ULTRAVIOLETA DE BAJO CONSUMO

- Para la lámpara LED visible, 29,25W. 0,01g TiO<sub>2</sub>:

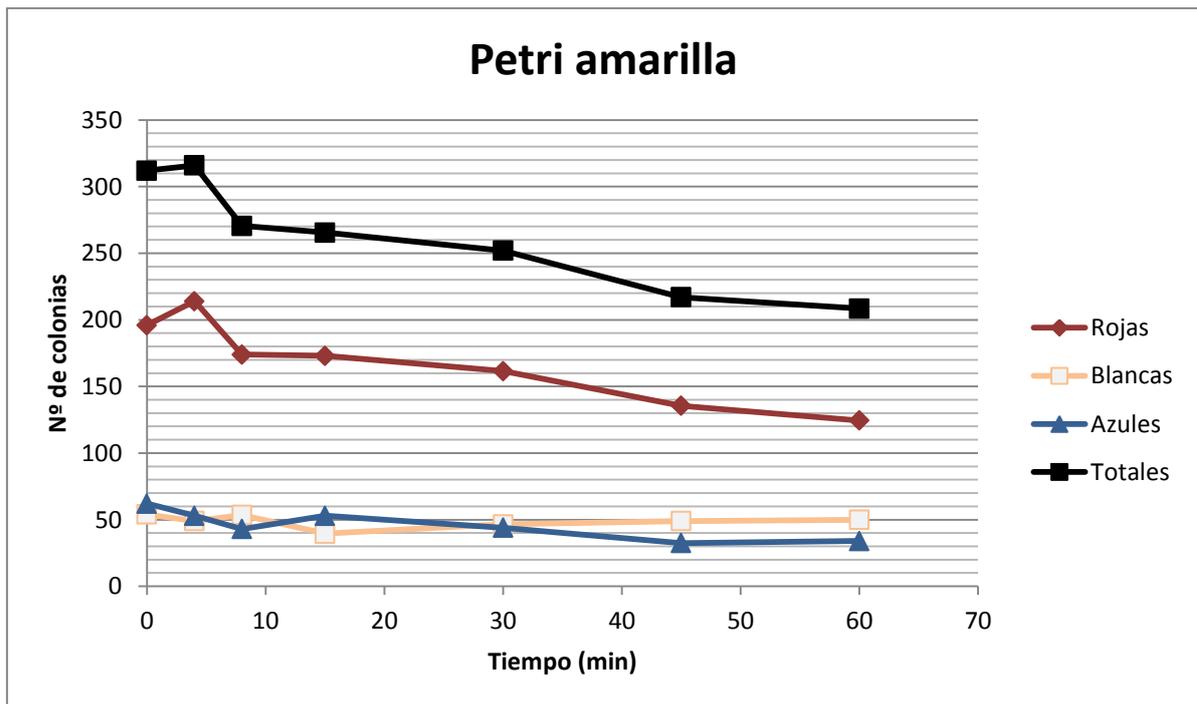


Figura 72. Nº de colonias en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. LED visible, 29,25W. 0,01g TiO<sub>2</sub>.

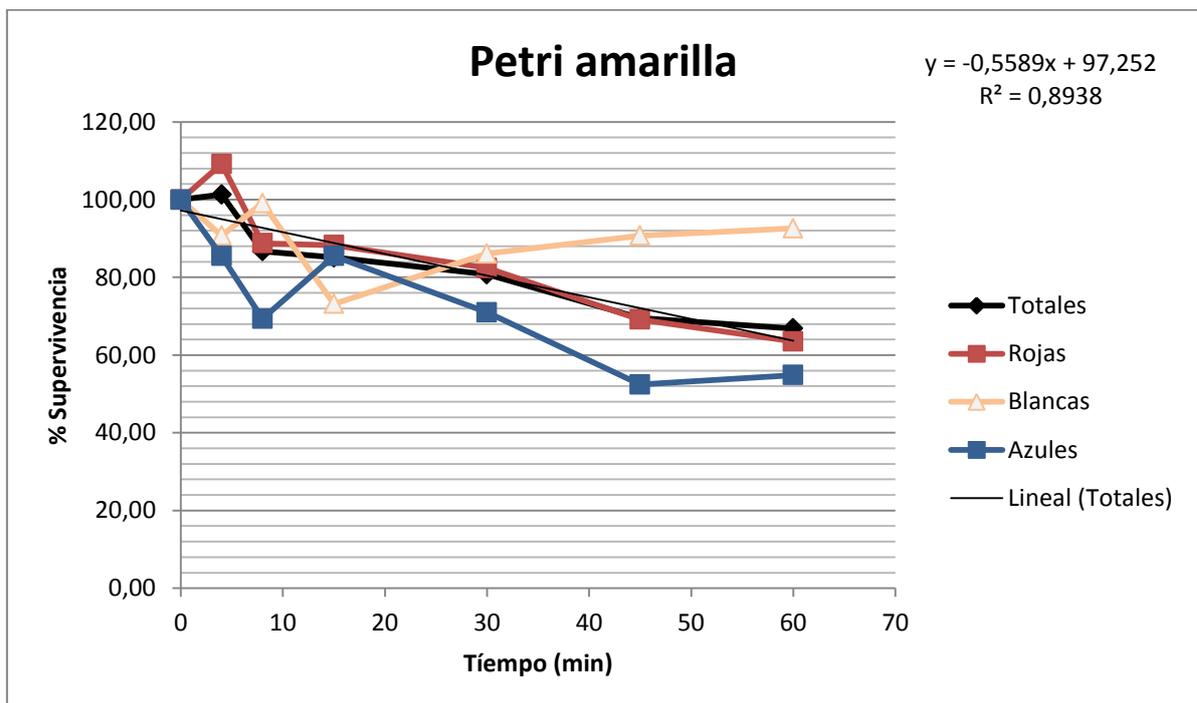


Figura 73. Porcentaje de supervivencia en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. LED visible, 29,25W. 0,01g TiO<sub>2</sub>.

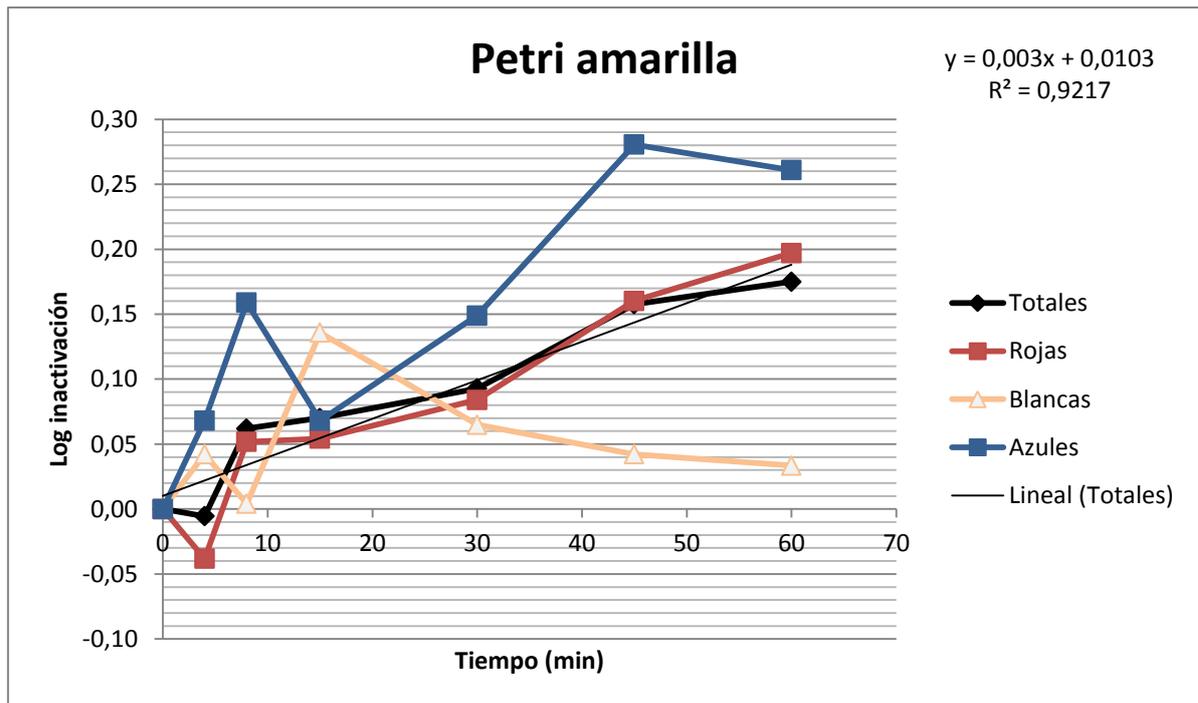


Figura 74. Logaritmo de inactivación en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. LED visible, 29,25W. 0,01g TiO<sub>2</sub>.

En la prueba de desinfección utilizando la lámpara LED visible y añadiendo el catalizador TiO<sub>2</sub> al agua contaminada no se consigue la eliminación total de coliformes en 60 minutos de irradiación. El logaritmo de inactivación de *K. pneumoniae*, *E. aerogenes* y *C. freundii* en el minuto 60 es de 0,20 y el logaritmo de inactivación en el minuto 60 para las especies de bacterias no coliformes (*E. faecalis* y *P. aeruginosa*) es de 0,03. El logaritmo de inactivación de bacterias totales es de 0,18 en el minuto 60. El valor de inactivación que se consigue en el minuto 60 es más bajo que el de la misma lámpara sin catalizador, lo que puede deberse a que hay mayor número de bacterias en el agua y la efectividad es menor.

REDUCCIÓN DE PATÓGENOS EN AGUA DE CONSUMO Y REUTILIZADAS MEDIANTE APLICACIÓN DE LUZ ULTRAVIOLETA DE BAJO CONSUMO

- Para la lámpara UV-LED 385 nm, 8W. 0,01g TiO<sub>2</sub> (P-25):

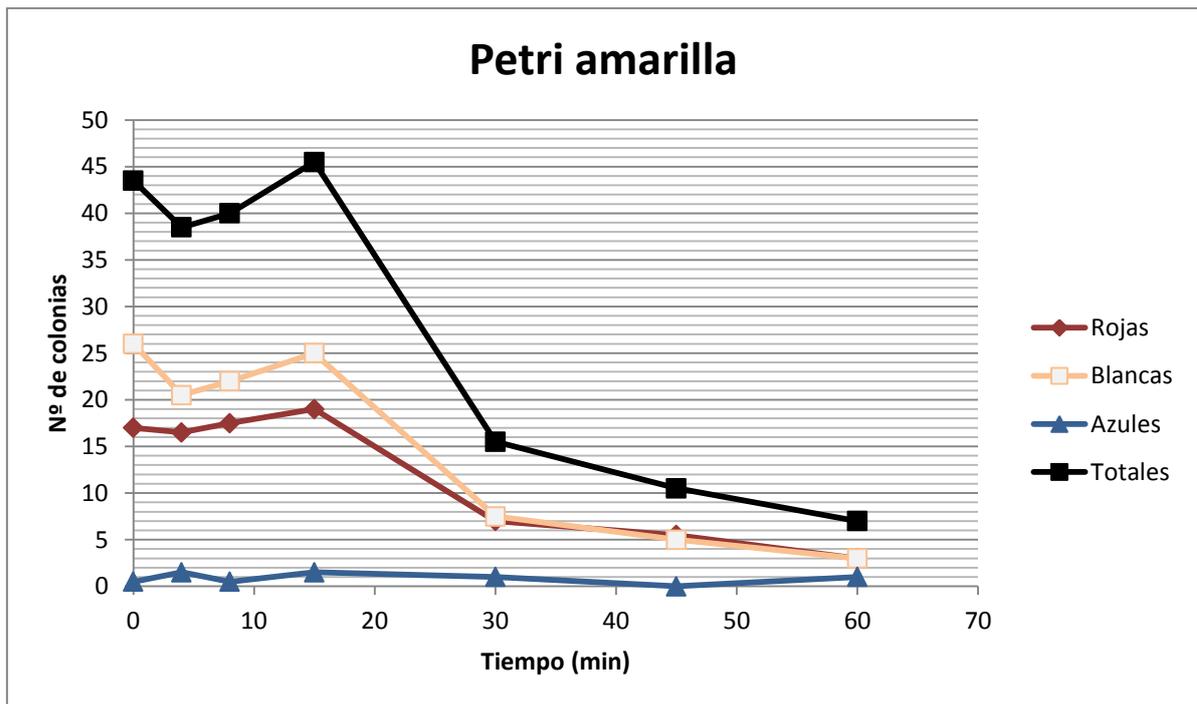


Figura 75. Nº de colonias en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. UV-LED 385nm, 8W. 0,01g TiO<sub>2</sub> (P-25).

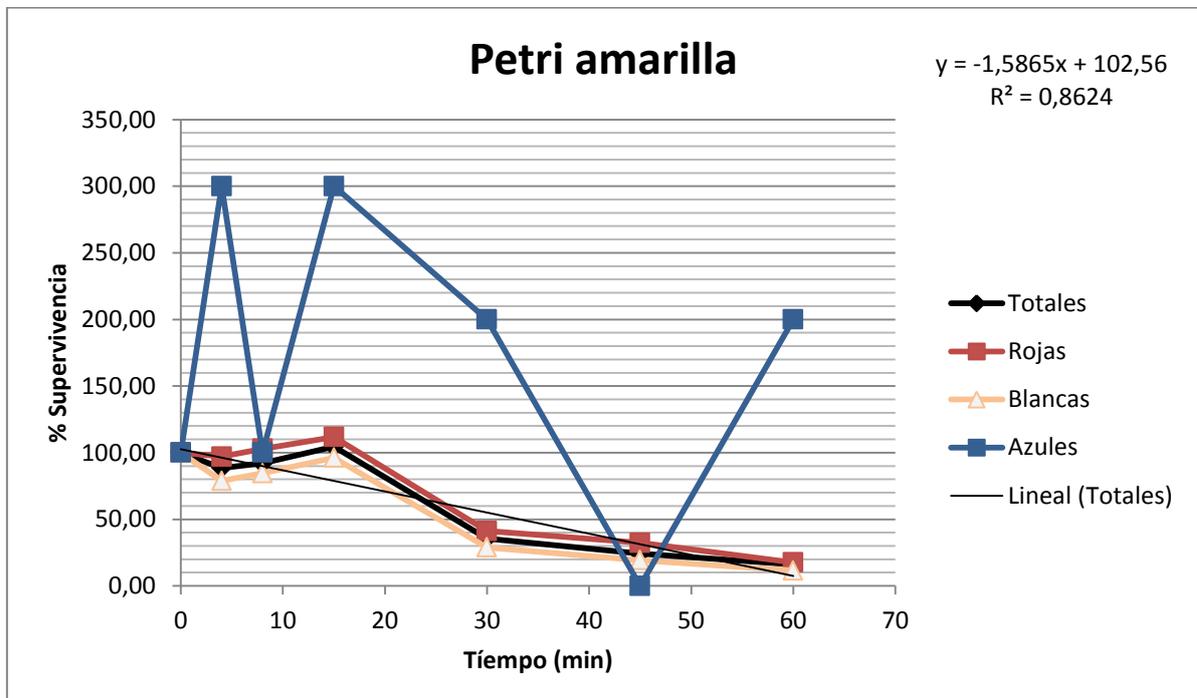


Figura 76. Porcentaje de supervivencia en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. UV-LED 385nm, 8W. 0,01g TiO<sub>2</sub> (P-25).

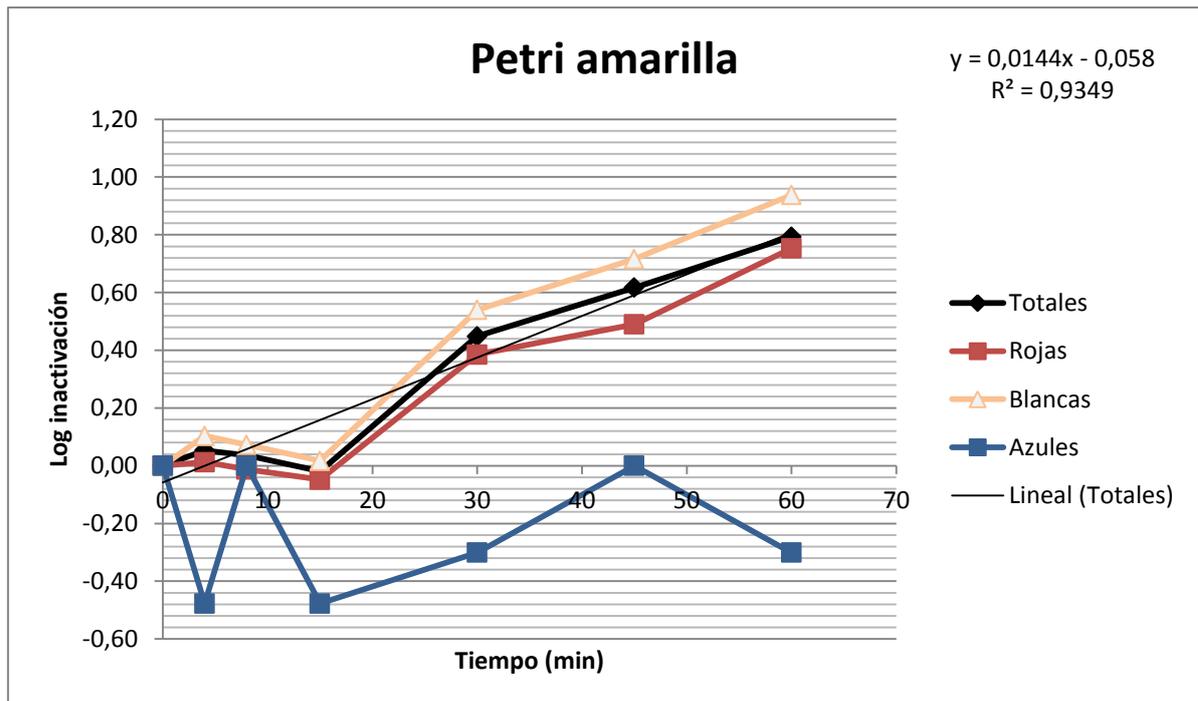


Figura 77. Logaritmo de inactivación en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. UV-LED 385nm, 8W. 0,01g TiO<sub>2</sub> (P-25).

En esta prueba con la lámpara UV-LED 385 nm añadiendo 0,01 g de catalizador TiO<sub>2</sub> Degussa P-25 al agua contaminada no se consigue la eliminación total de coliformes en 60 minutos de irradiación. El logaritmo de inactivación de *E. aerogenes*, *C. freundii* y *K. pneumoniae* en el minuto 60 es de 0,75 y el logaritmo de inactivación en el minuto 60 para las bacterias no coliformes *E. faecalis* y *P. aeruginosa* es de 0,94. El logaritmo de inactivación de bacterias totales es de 0,79 en el minuto 60.

REDUCCIÓN DE PATÓGENOS EN AGUA DE CONSUMO Y REUTILIZADAS MEDIANTE APLICACIÓN DE LUZ ULTRAVIOLETA DE BAJO CONSUMO

- Para la lámpara UV-LED 395nm, 8W. 0,01g TiO<sub>2</sub> (P-25):

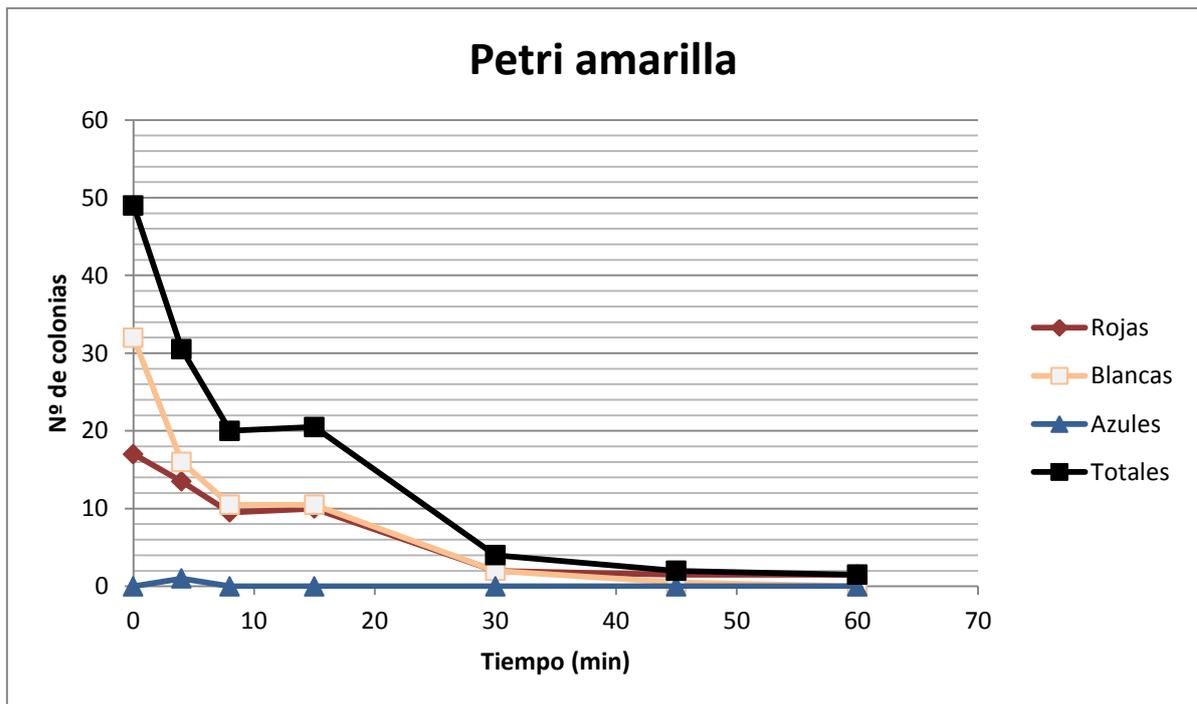


Figura 78. Nº de colonias en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. UV-LED 395nm, 8W. 0,01g TiO<sub>2</sub> (P-25).

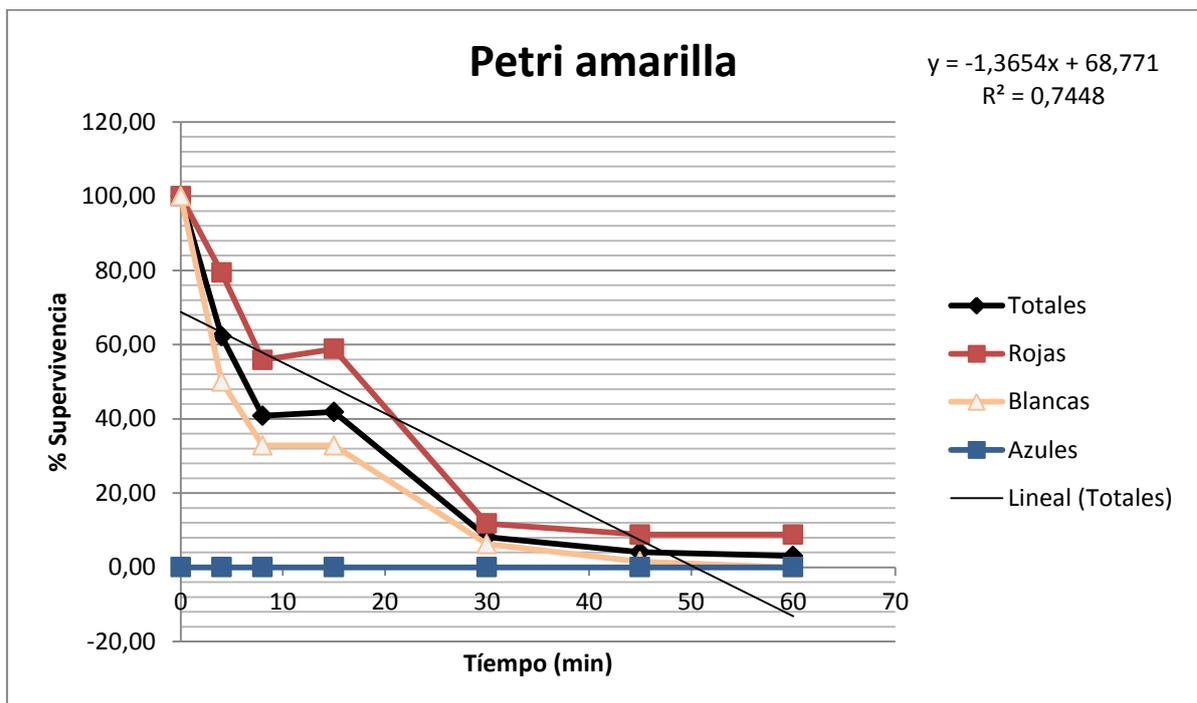


Figura 79. Porcentaje de supervivencia en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. UV-LED 395nm, 8W. 0,01g TiO<sub>2</sub> (P-25).

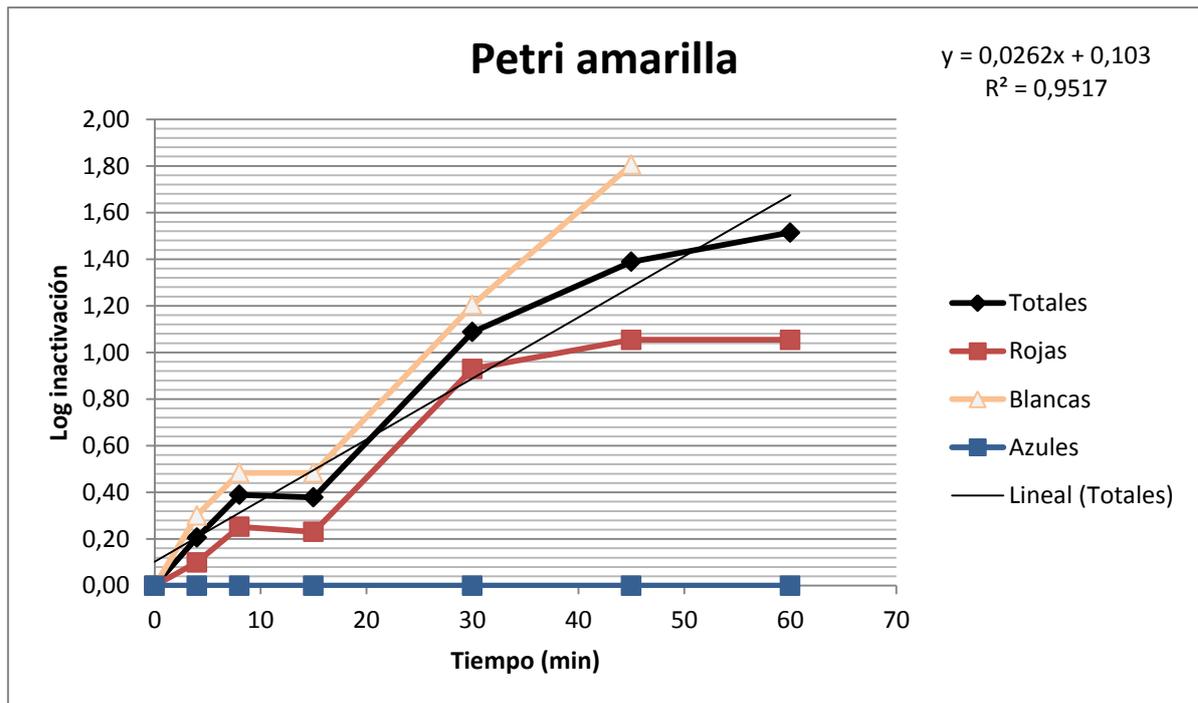


Figura 80. Logaritmo de inactivación en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. UV-LED 395nm, 8W. 0,01g TiO<sub>2</sub> (P-25).

En esta prueba con la lámpara UV-LED 395 nm añadiendo 0,01g de catalizador TiO<sub>2</sub> Degussa P-25 al agua contaminada no se consigue la eliminación total de coliformes en 60 minutos de irradiación. El logaritmo de inactivación de *E. aerogenes*, *C. freundii* y *K. pneumoniae* en el minuto 60 es de 1,05 y el logaritmo de inactivación en el minuto 45 para las bacterias no coliformes *E. faecalis* y *P. aeruginosa* es de 1,81. El logaritmo de inactivación de bacterias totales es de 1,51 en el minuto 60.

REDUCCIÓN DE PATÓGENOS EN AGUA DE CONSUMO Y REUTILIZADAS MEDIANTE APLICACIÓN DE LUZ ULTRAVIOLETA DE BAJO CONSUMO

- Para la lámpara UV-LED 385nm, 8W. 0,02g TiO<sub>2</sub> (P-25):

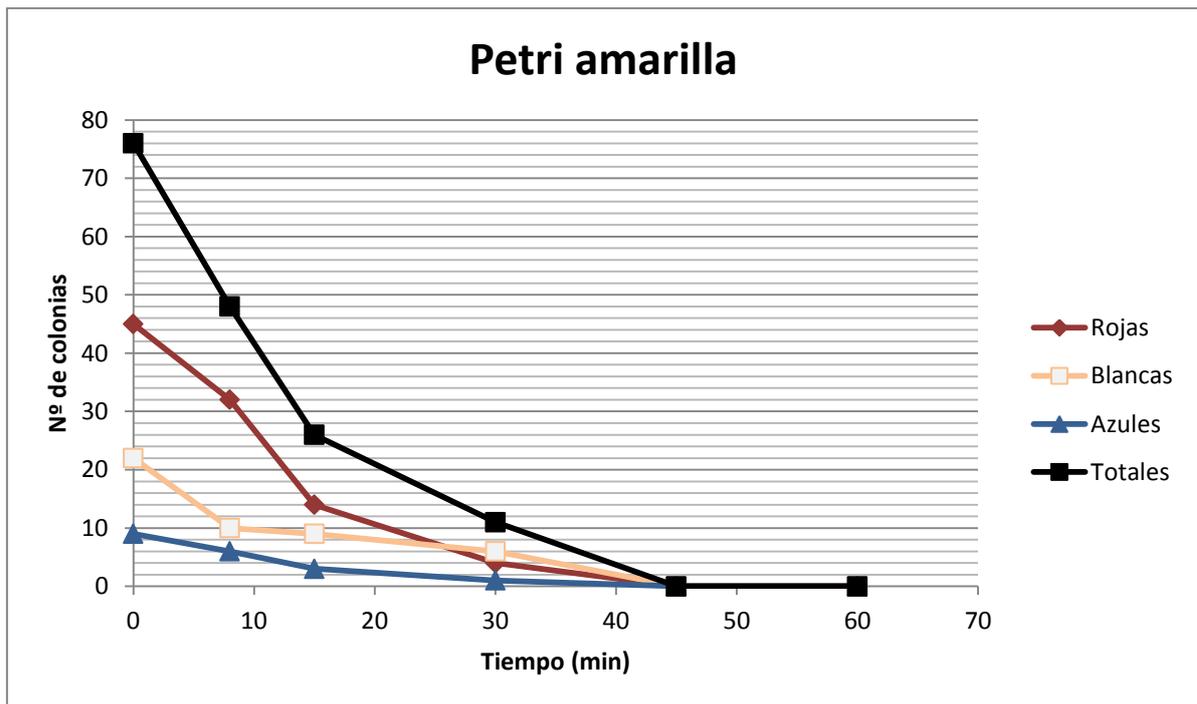


Figura 81. Nº de colonias en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. UV-LED 385nm, 8W. 0,02g TiO<sub>2</sub> (P-25).

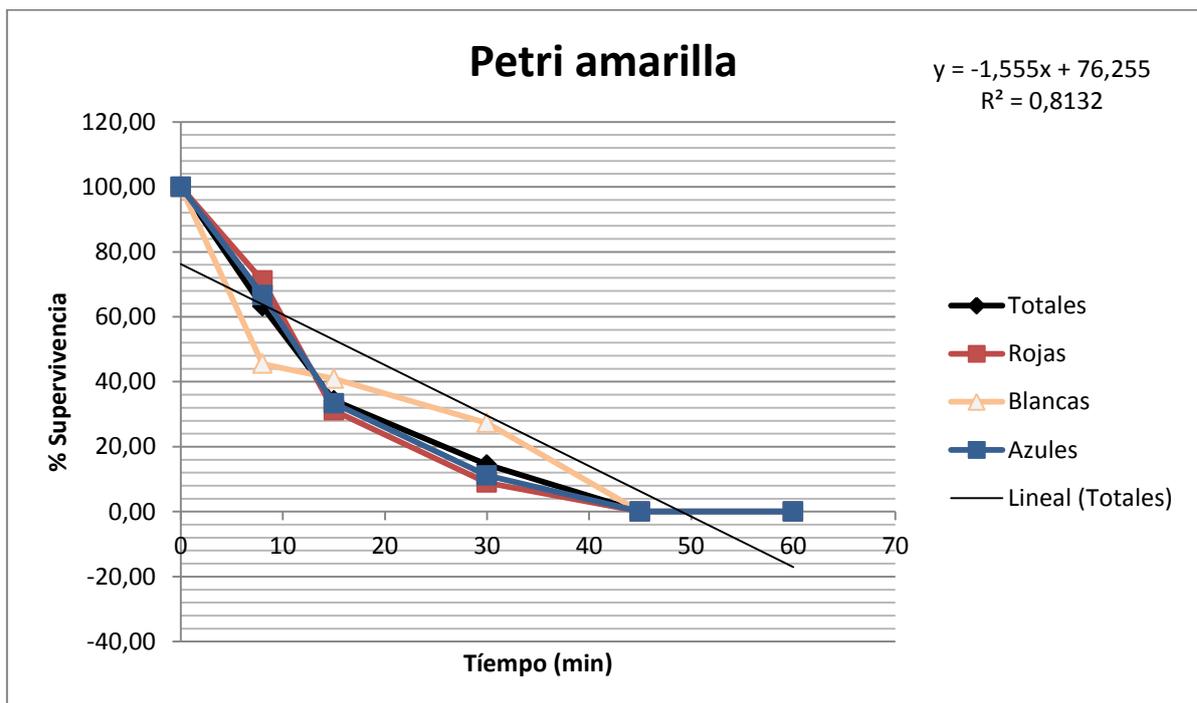


Figura 82. Porcentaje de supervivencia en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. UV-LED 385nm, 8W. 0,02g TiO<sub>2</sub> (P-25).

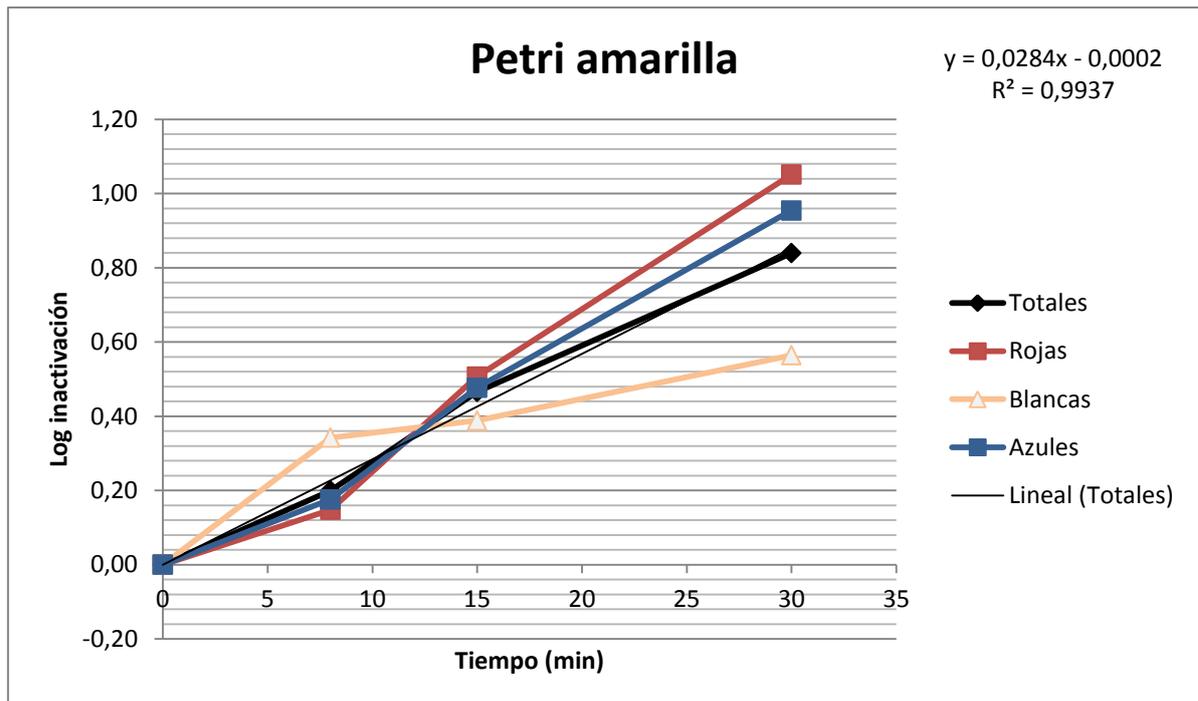


Figura 83. Logaritmo de inactivación en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. UV-LED 385nm, 8W. 0,02g TiO<sub>2</sub> (P-25).

En esta prueba con la lámpara UV-LED 385 añadiendo 0,02 g de catalizador TiO<sub>2</sub> Degussa P-25 al agua contaminada se consigue la eliminación total de coliformes en 45 minutos de irradiación. El logaritmo de inactivación de *E. aerogenes*, *C. freundii* y *K. pneumoniae* en el minuto 30 es de 1,05 y el logaritmo de inactivación en el minuto 30 para las bacterias no coliformes *E. faecalis* y *P. aeruginosa* es de 0,56. El logaritmo de inactivación de bacterias totales es de 0,84 en el minuto 30.

REDUCCIÓN DE PATÓGENOS EN AGUA DE CONSUMO Y REUTILIZADAS MEDIANTE APLICACIÓN DE LUZ ULTRAVIOLETA DE BAJO CONSUMO

- Para la lámpara UV-LED 395nm, 8W. 0,02g TiO<sub>2</sub> (P-25):

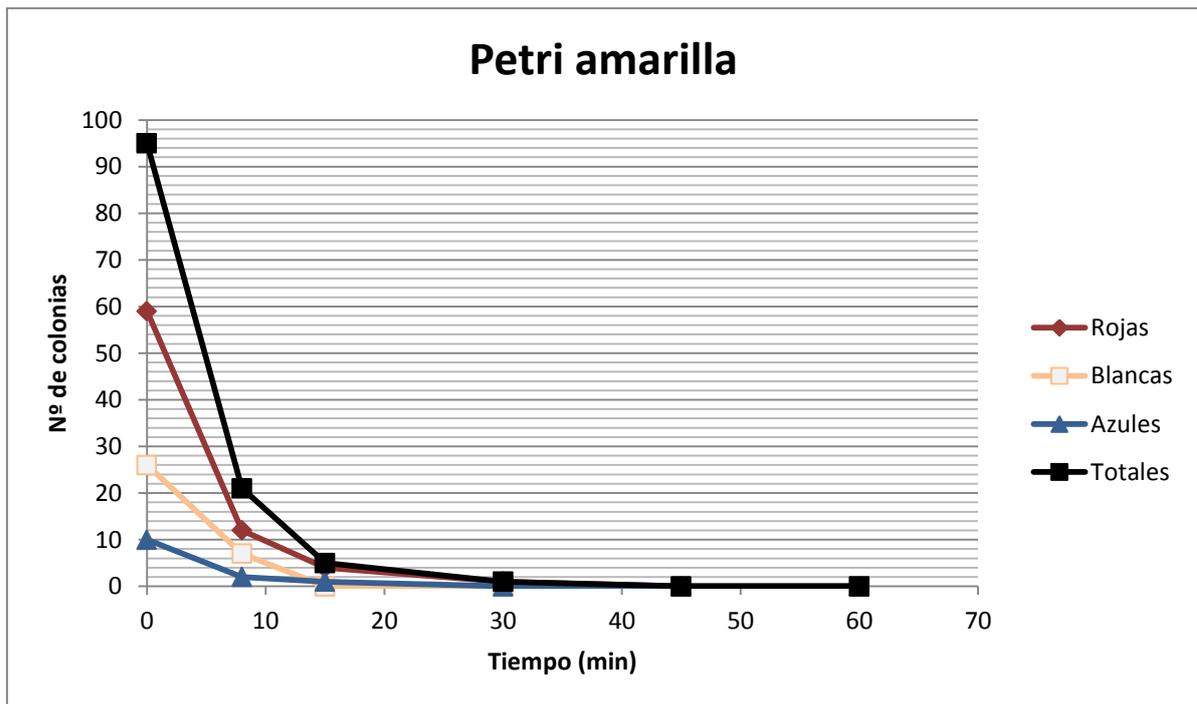


Figura 84. Nº de colonias en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. UV-LED 395nm, 8W. 0,02g TiO<sub>2</sub> (P-25).

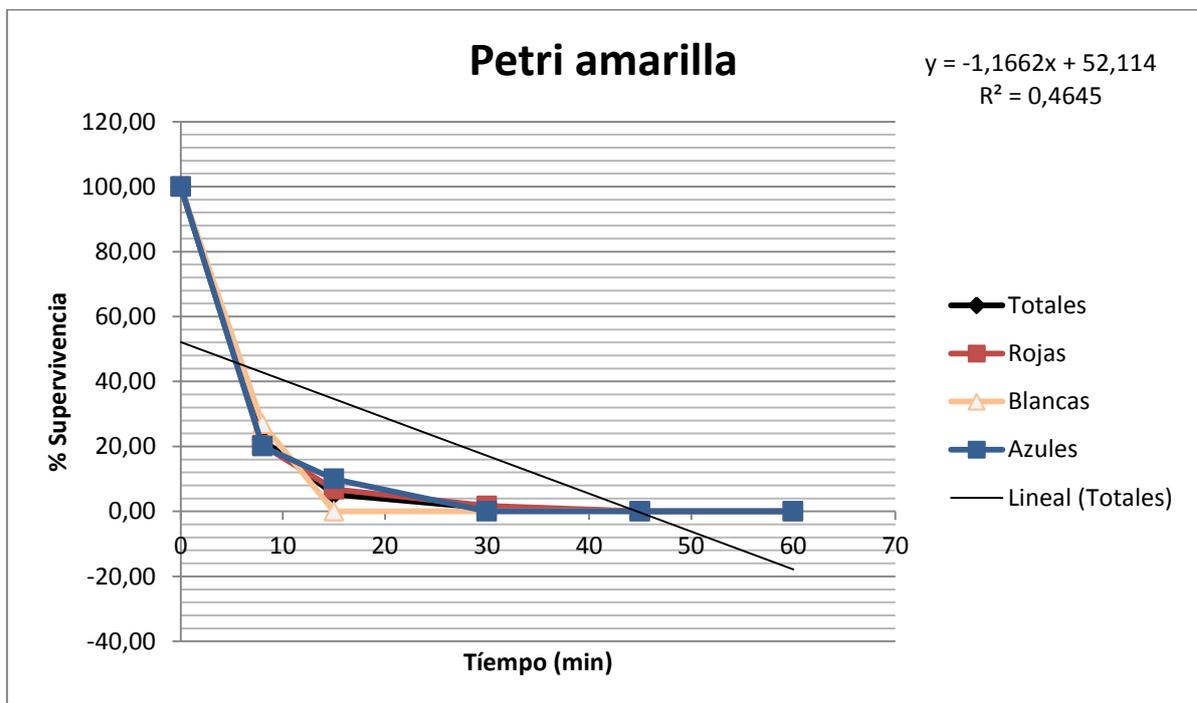


Figura 85. Porcentaje de supervivencia en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. UV-LED 395nm, 8W. 0,02g TiO<sub>2</sub> (P-25).

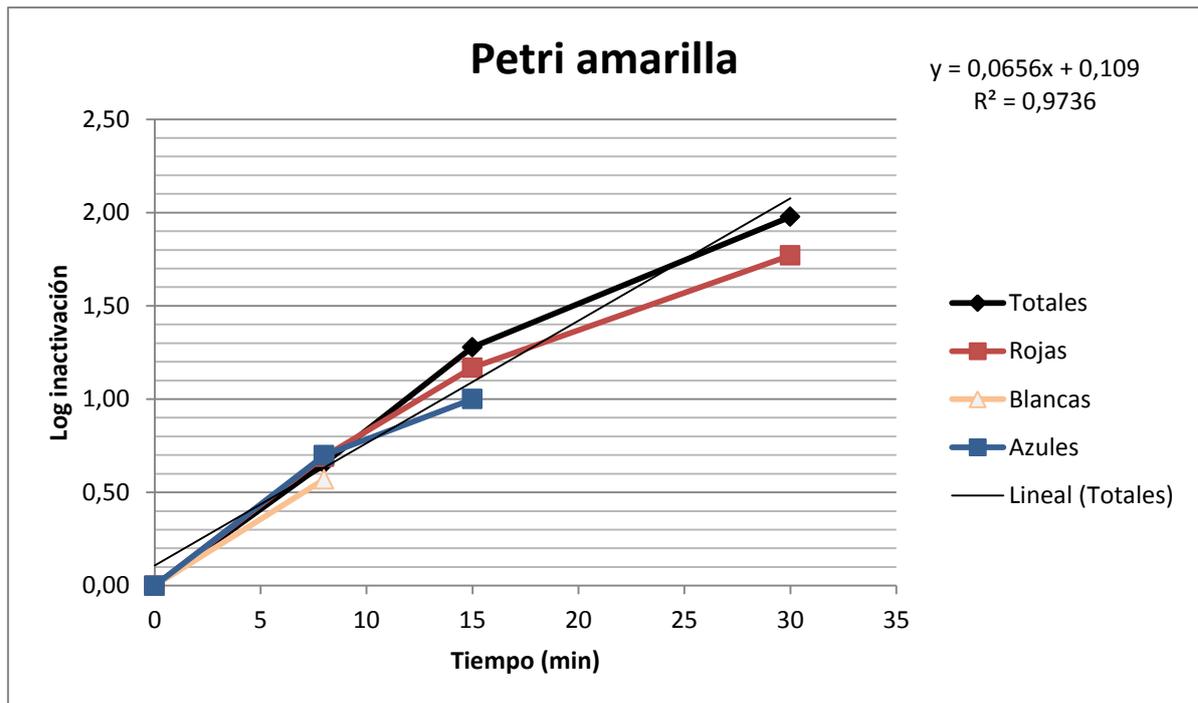


Figura 86. Logaritmo de inactivación en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. UV-LED 395nm, 8W. 0,02g TiO<sub>2</sub> (P-25).

En esta prueba con la lámpara UV-LED 395 nm, añadiendo 0,02 g de catalizador TiO<sub>2</sub> Degussa P-25 al agua contaminada, se consigue la eliminación total de coliformes en 45 minutos de irradiación. El logaritmo de inactivación de *E. aerogenes*, *C. freundii* y *K. pneumoniae* en el minuto 30 es de 1,77 y el logaritmo de inactivación en el minuto 8 para las bacterias no coliformes *E. faecalis* y *P. aeruginosa* es de 0,57. El logaritmo de inactivación de bacterias totales es de 1,98 en el minuto 30.

REDUCCIÓN DE PATÓGENOS EN AGUA DE CONSUMO Y REUTILIZADAS MEDIANTE APLICACIÓN DE LUZ ULTRAVIOLETA DE BAJO CONSUMO

- Para la lámpara UV-LED 365nm, 8W (8\*):

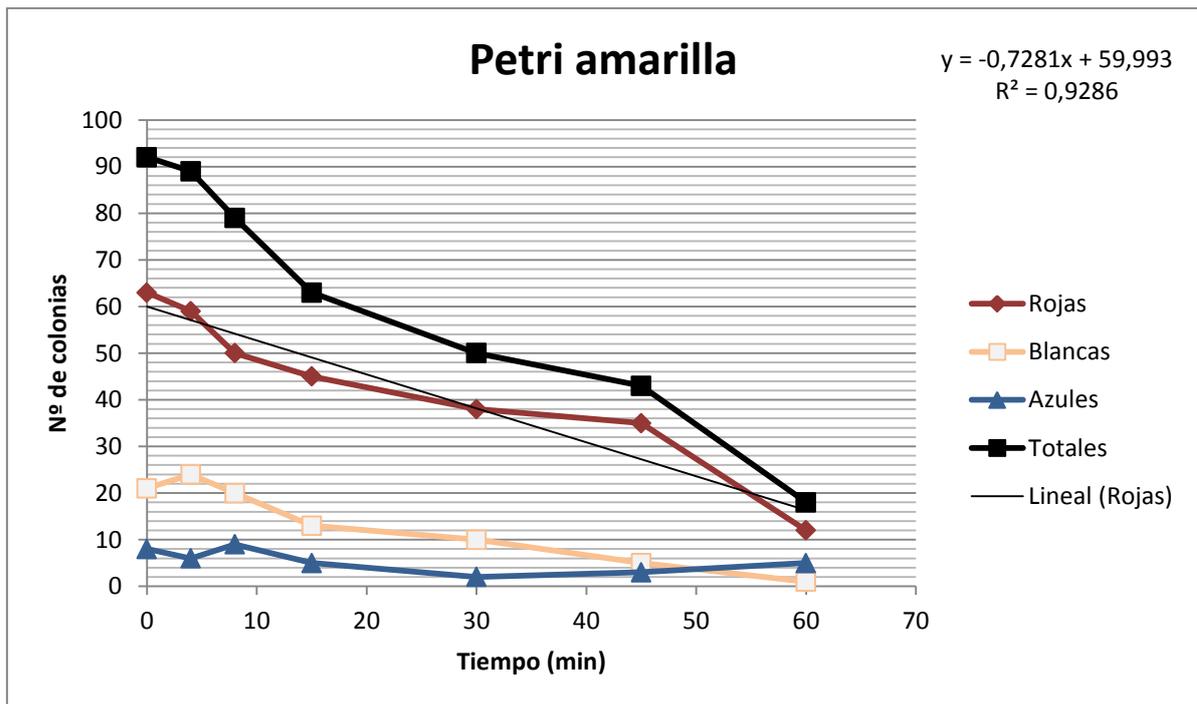


Figura 87. Nº de colonias en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. UV-LED 365nm, 8W. 8\* LEDs.

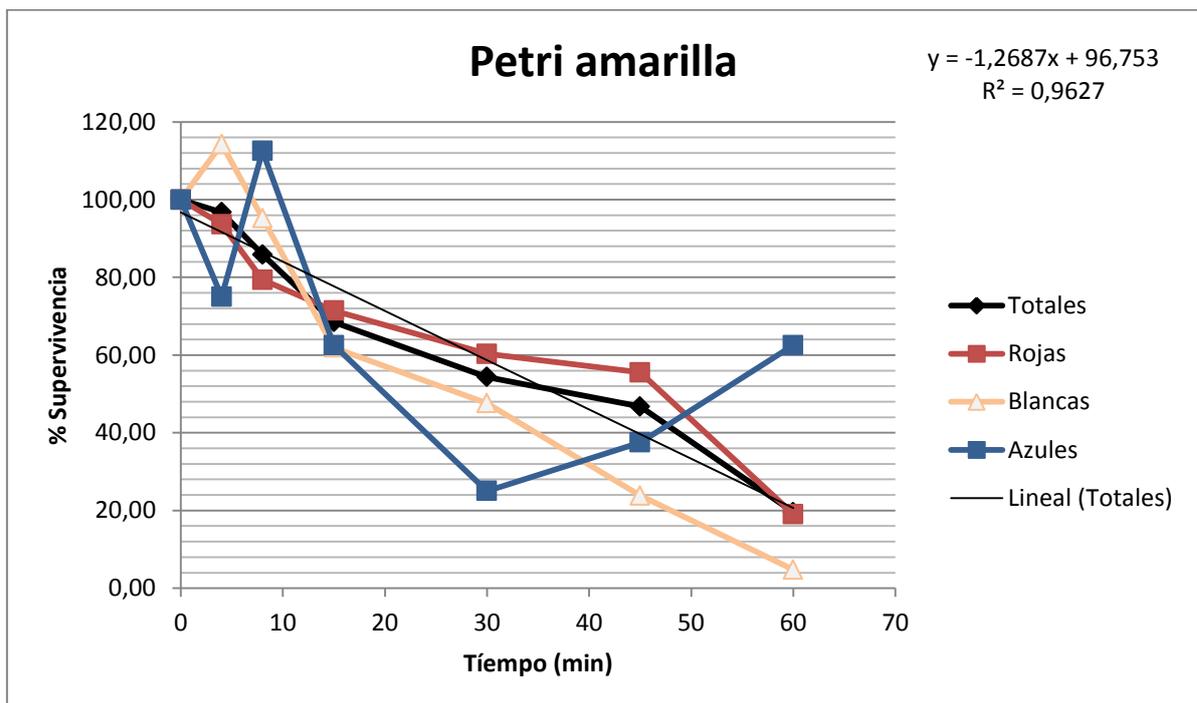


Figura 88. Porcentaje de supervivencia en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. UV-LED 365nm, 8W. 8\* LEDs.

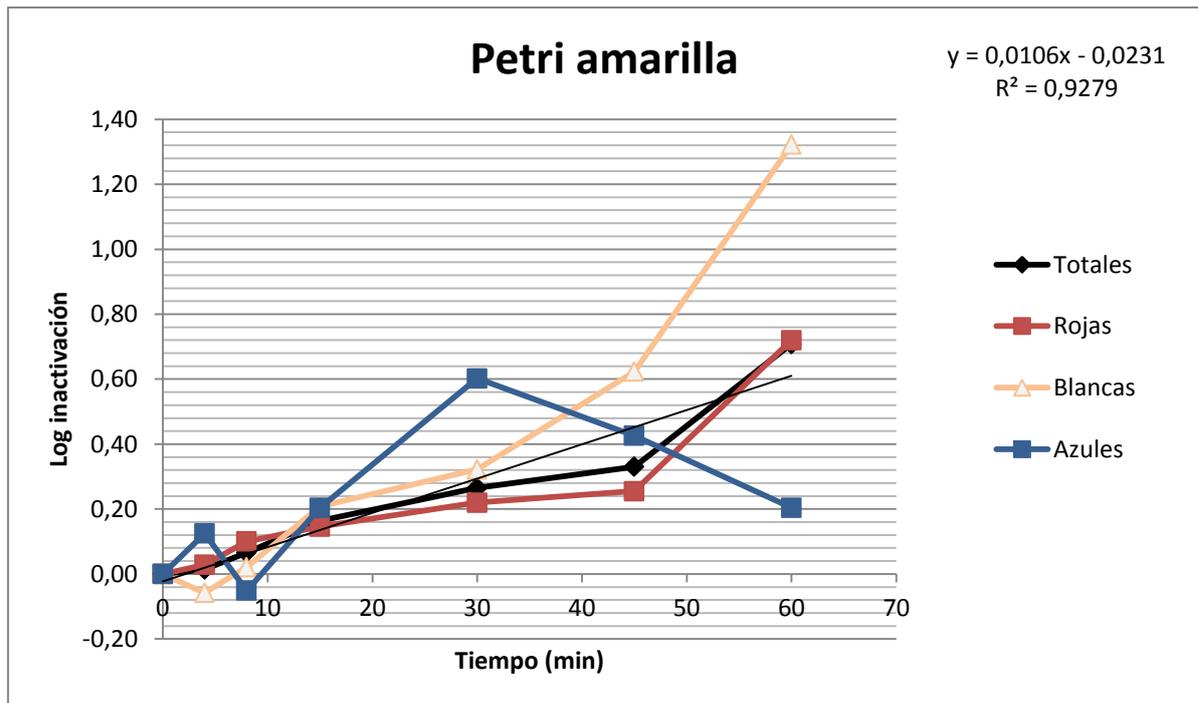


Figura 89. Logaritmo de inactivación en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. UV-LED 365nm, 8W. 8\* LEDs.

En esta prueba con la lámpara UV-LED 365nm con 8 LEDs no se consigue la eliminación total de coliformes en 60 minutos de irradiación. El logaritmo de inactivación de *E. aerogenes*, *C. freundii* y *K. pneumoniae* en el minuto 60 es de 0,72 y el logaritmo de inactivación en el minuto 60 para las bacterias no coliformes *E. faecalis* y *P. aeruginosa* es de 1,32. El logaritmo de inactivación de bacterias totales es de 0,71 en el minuto 60.

**ANEXO VII. CAPACIDAD DE INACTIVACIÓN PARA *E. COLI* Y COLIFORMES TOTALES.**

A continuación se representa la energía consumida por logaritmo de inactivación para los ensayos realizados.

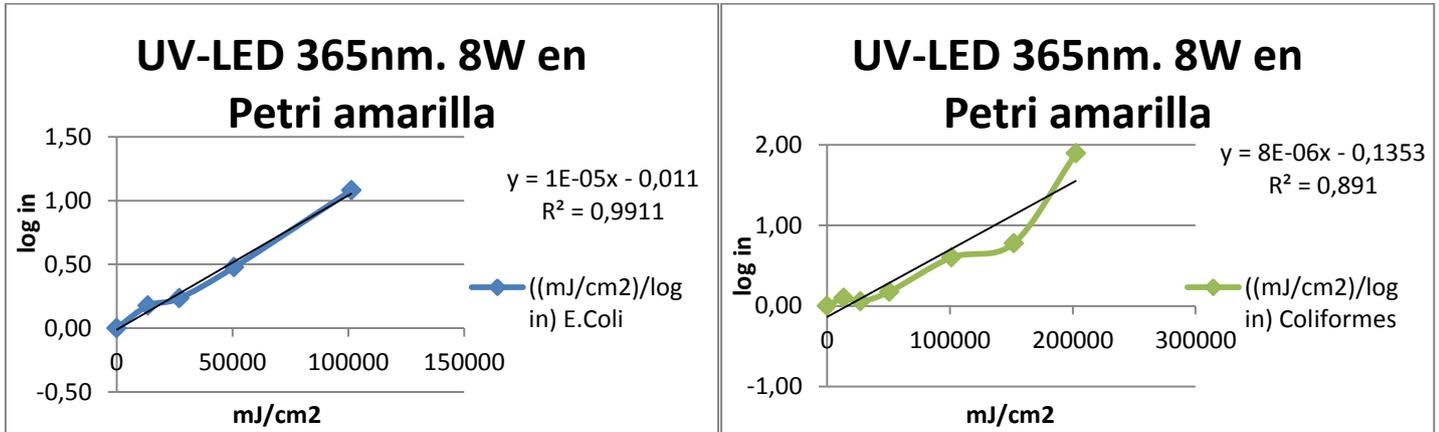


Figura 90. Capacidad de inactivación para *E. coli* y coliformes totales de UV-LED 365nm. 8W, en Petri amarilla.

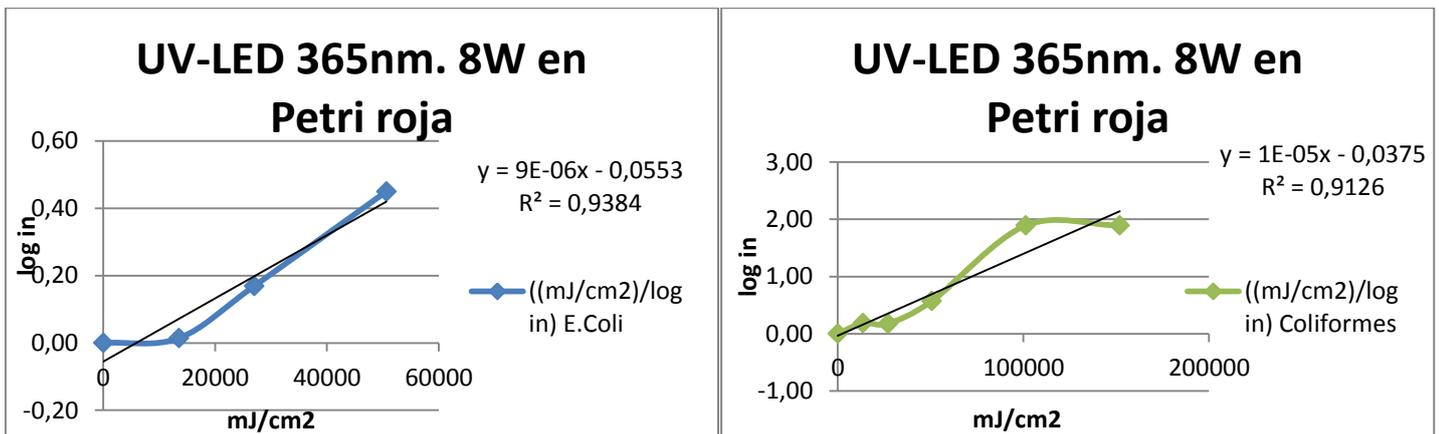


Figura 91. Capacidad de inactivación para *E. coli* y coliformes totales de UV-LED 365nm. 8W, en Petri roja.

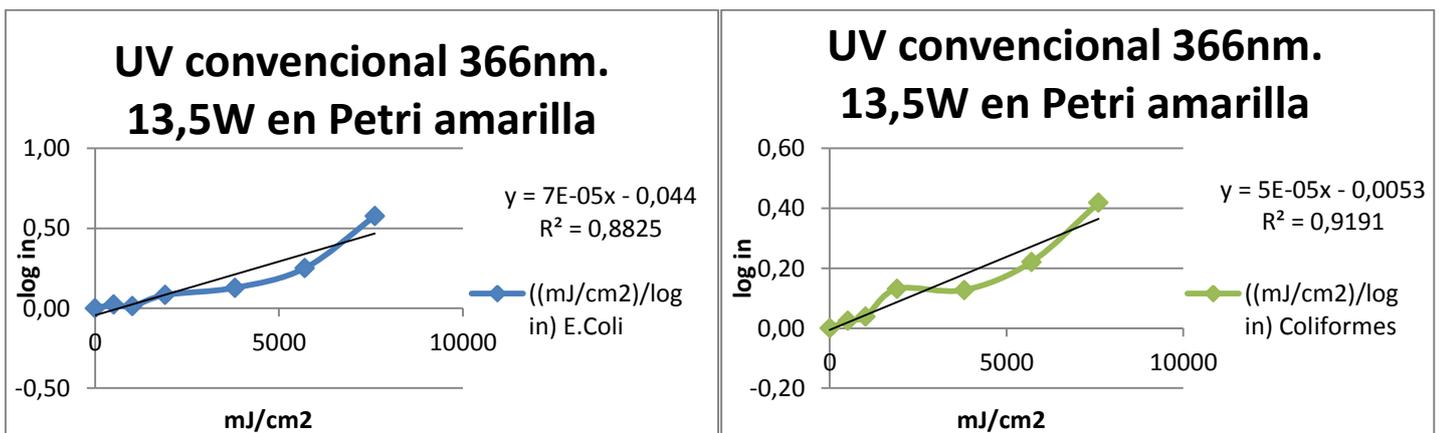


Figura 92. Capacidad de inactivación para *E. coli* y coliformes totales de UV convencional 366nm. 13,5W, en Petri amarilla.

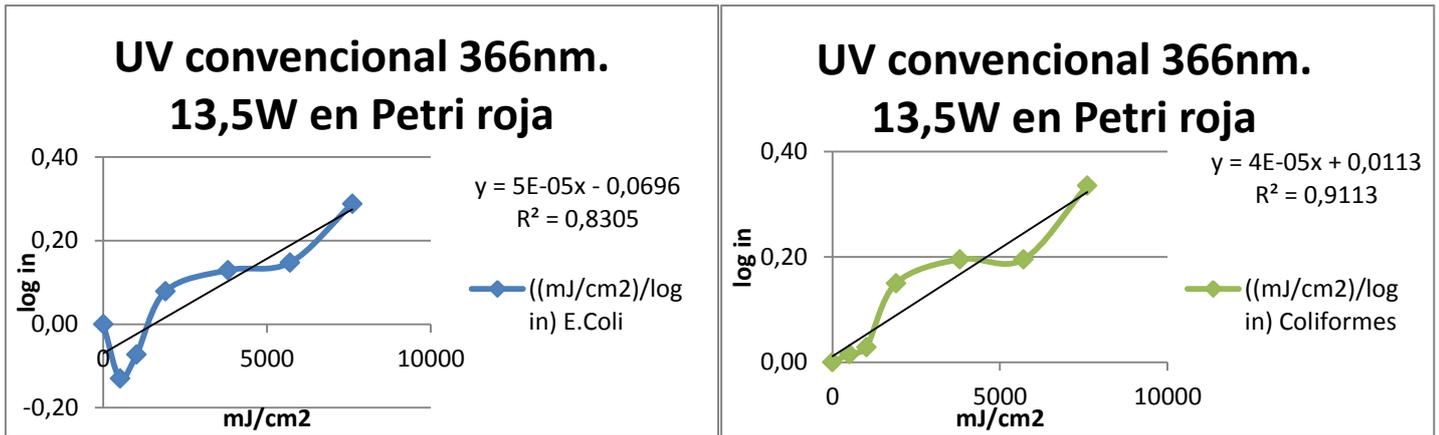


Figura 93. Capacidad de inactivación para *E. coli* y coliformes totales de UV convencional 366nm. 13,5W, en Petri roja.

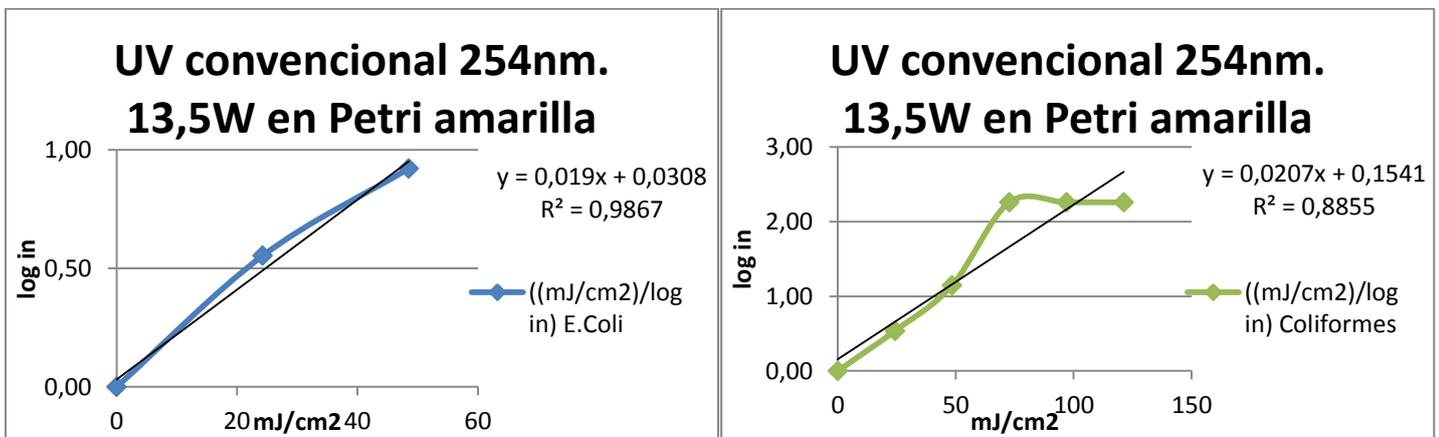


Figura 94. Capacidad de inactivación para *E. coli* y coliformes totales de UV convencional 254nm. 13,5W, en Petri amarilla.

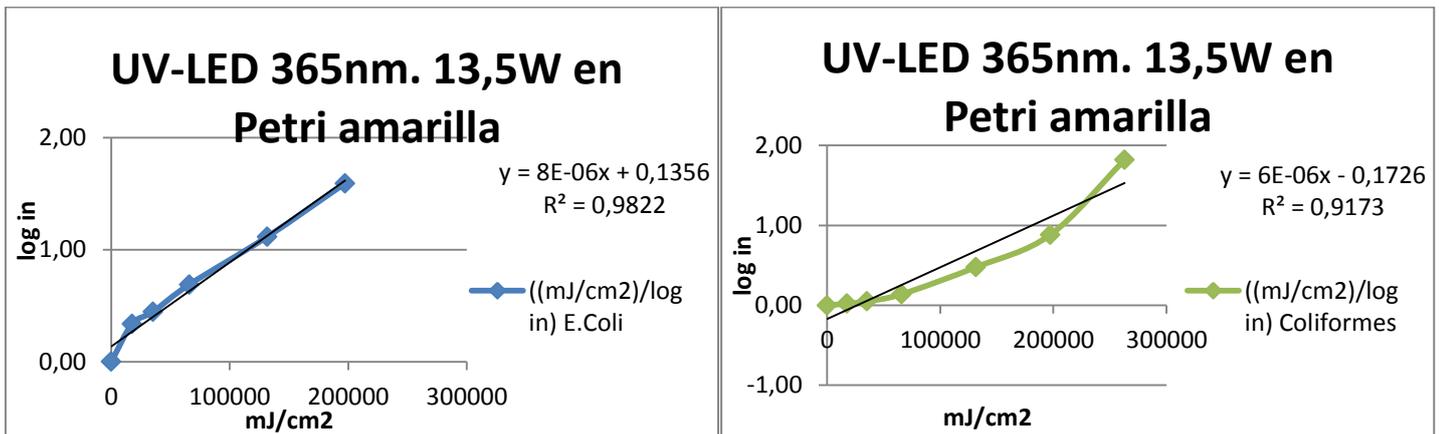


Figura 95. Capacidad de inactivación para *E. coli* y coliformes totales de UV-LED 365nm. 13,5W, en Petri amarilla.

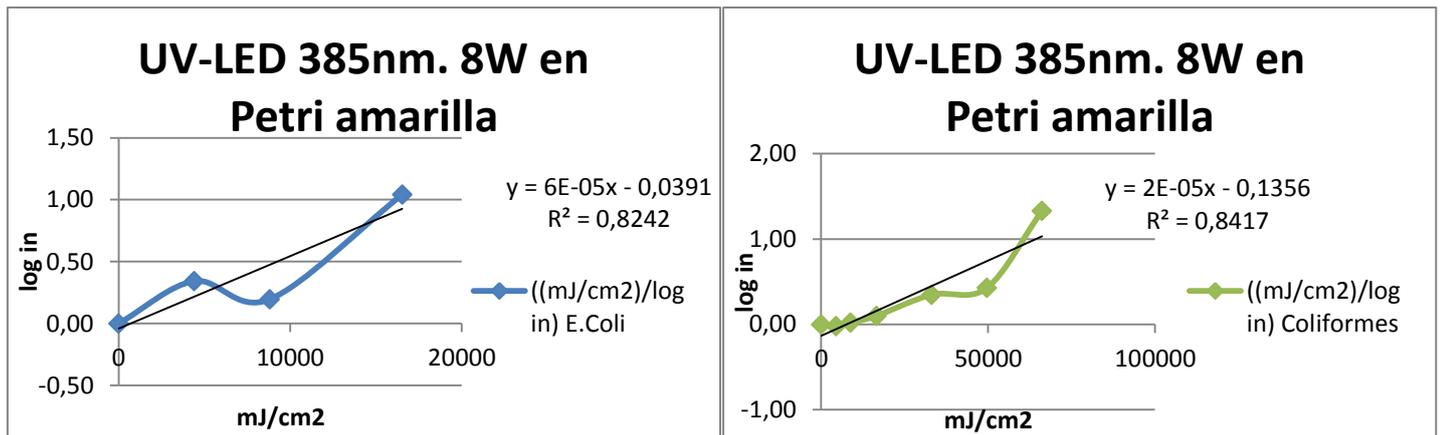


Figura 96. Capacidad de inactivación para *E. coli* y coliformes totales de UV-LED 385nm. 8W, en Petri amarilla.

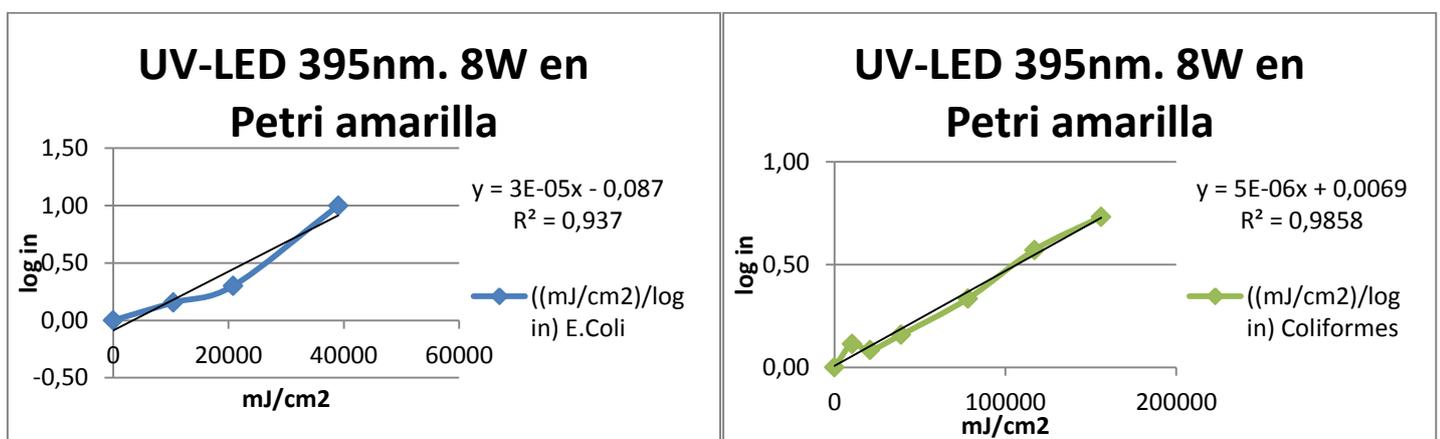


Figura 97. Capacidad de inactivación para *E. coli* y coliformes totales de UV-LED 395nm. 8W, en Petri amarilla.

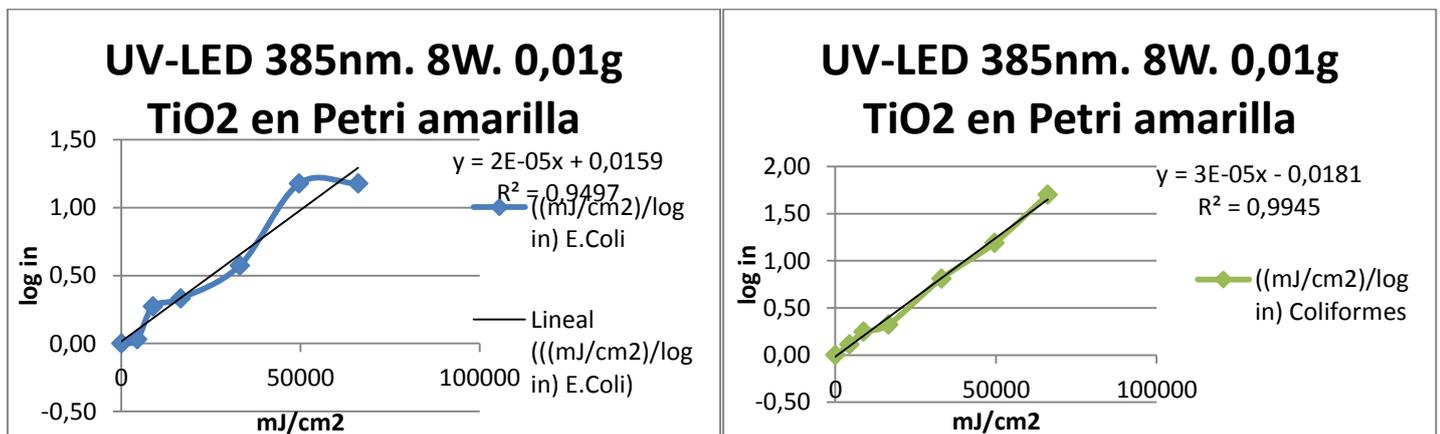
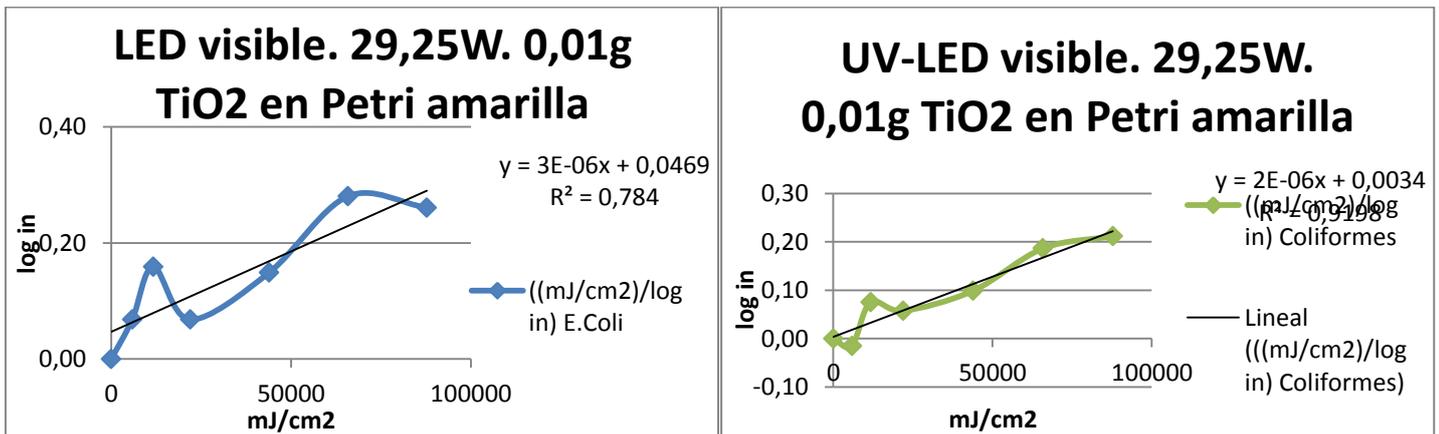
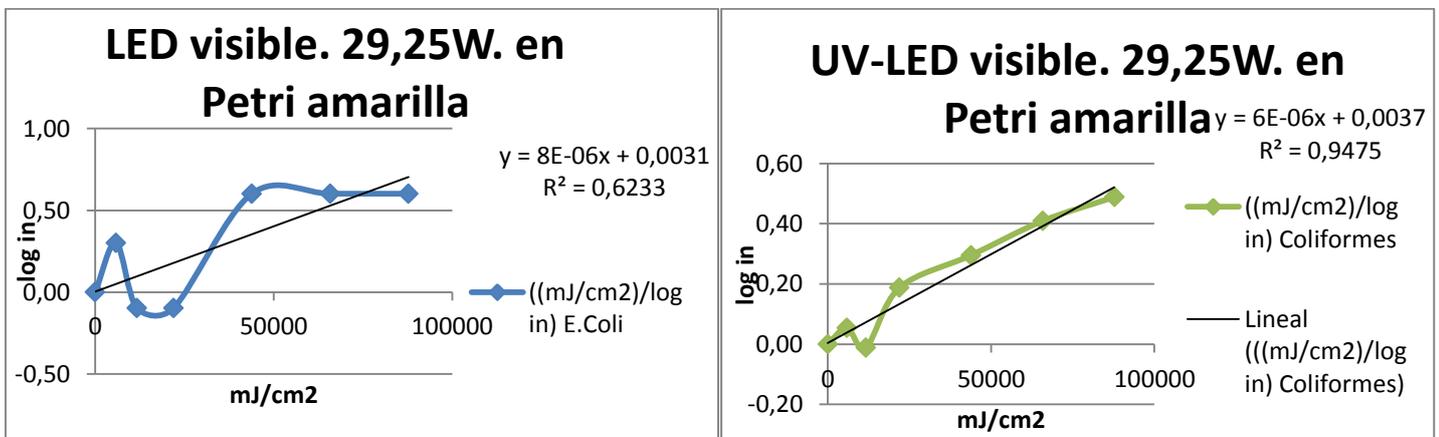
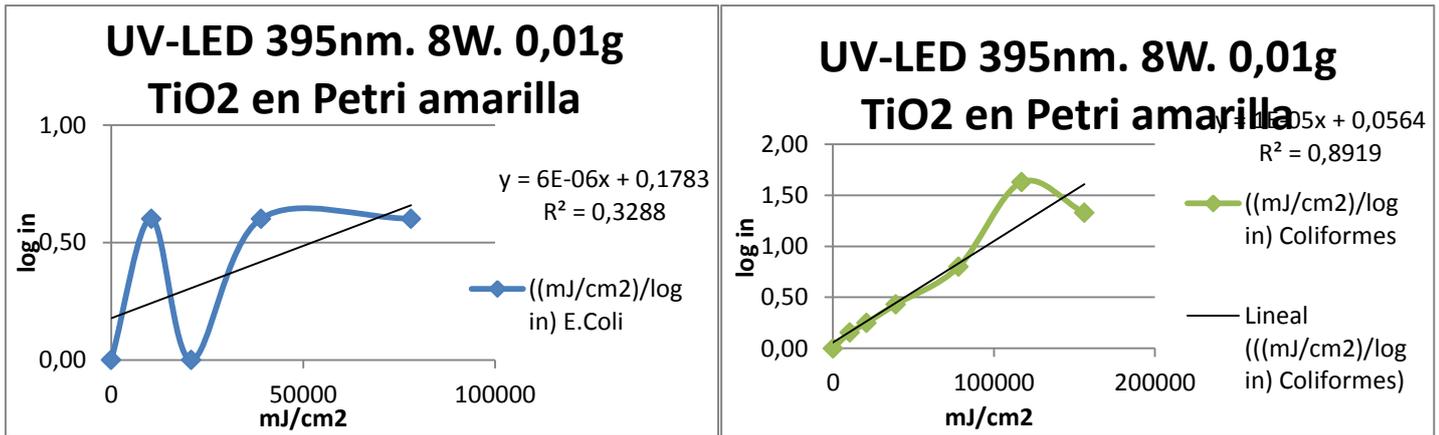


Figura 98. Capacidad de inactivación para *E. coli* y coliformes totales de UV-LED 385nm. 8W. 0,01g TiO<sub>2</sub>, en Petri amarilla.



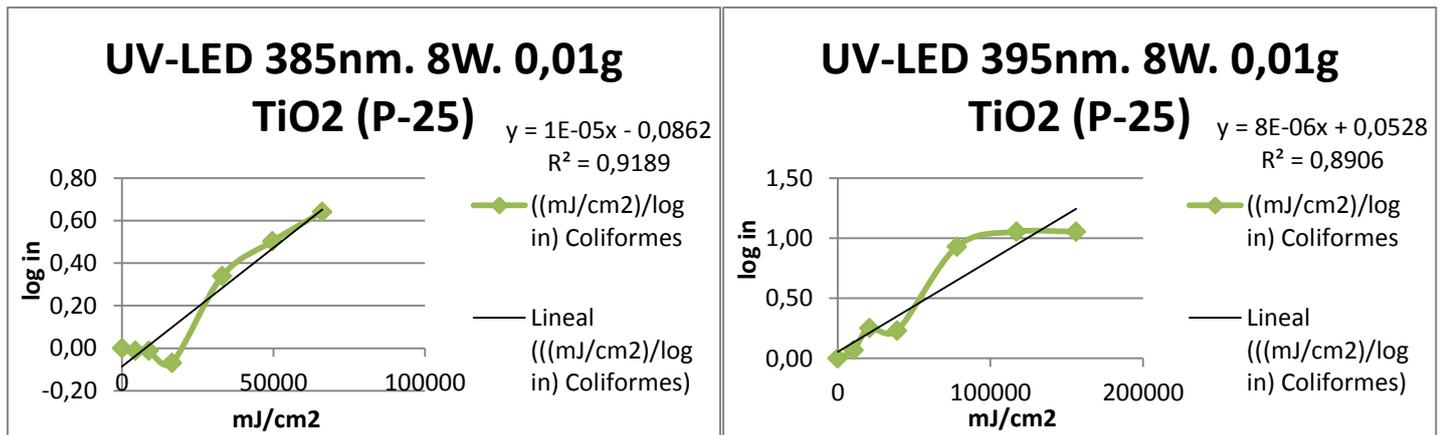


Figura 102. Capacidad de inactivación para coliformes totales de UV-LED 385 y 395nm. 8W. 0,01g TiO<sub>2</sub> (P-25), en Petri amarilla.

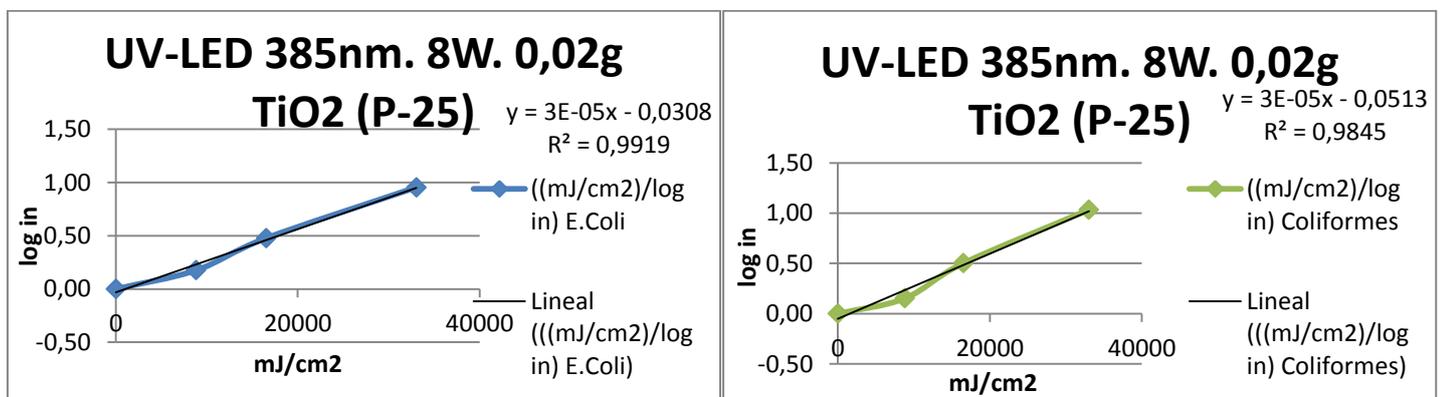


Figura 103. Capacidad de inactivación para *E. coli* y coliformes totales de UV-LED 385nm. 8W. 0,02g TiO<sub>2</sub> (P-25), en Petri amarilla.

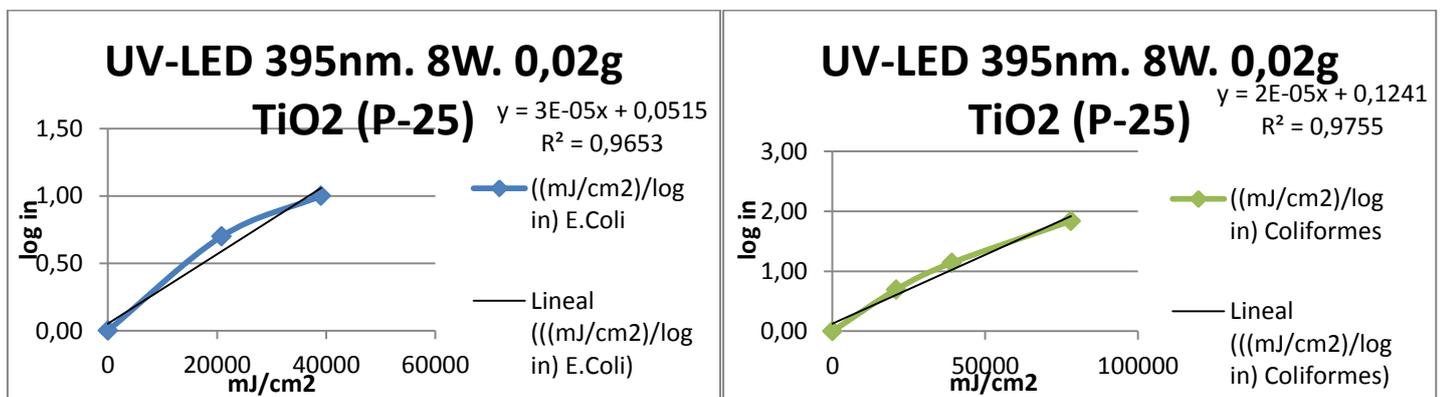


Figura 104. Capacidad de inactivación para *E. coli* y coliformes totales de UV-LED 395nm. 8W. 0,02g TiO<sub>2</sub> (P-25), en Petri amarilla.

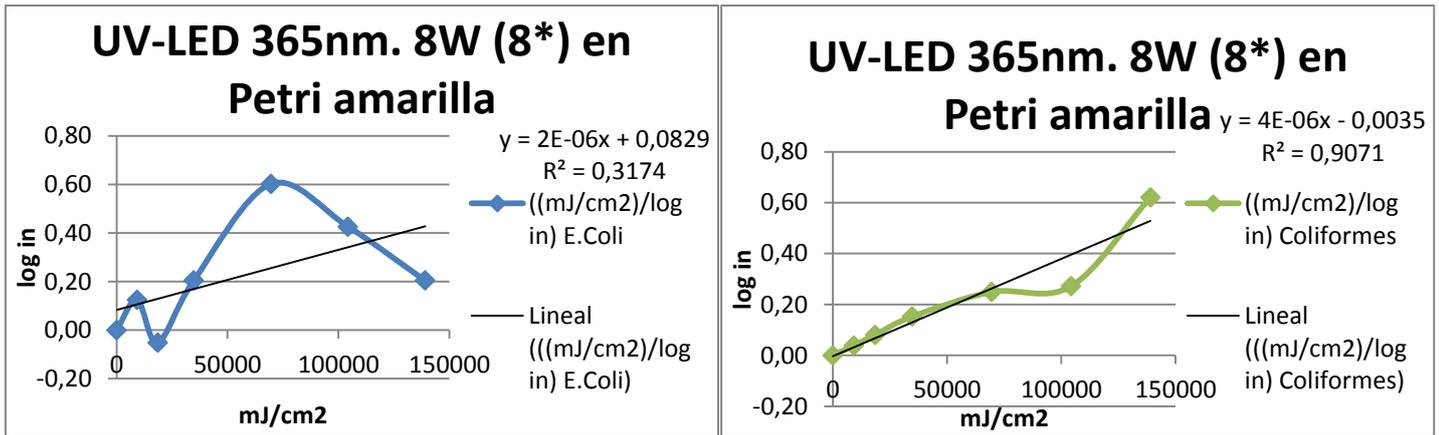


Figura 105. Capacidad de inactivación para *E. coli* y coliformes totales de UV-LED 365nm. 8W (8\*). Con 8 LEDs en Petri amarilla.

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Lámpara UV de vapor de mercurio (detalle).....                                                                                                       | 8  |
| Figura 2. Lámpara UV-LED (detalle).....                                                                                                                        | 8  |
| Figura 3. Longitudes de onda del espectro luminoso.....                                                                                                        | 9  |
| Figura 4. Alteración de la estructura del ADN por fotón UV incidente.....                                                                                      | 10 |
| Figura 5. Intensidad relativa respecto a longitud de onda comparando lámparas UV de baja y media presión con la efectividad germicida para <i>E.coli</i> ..... | 10 |
| Figura 6. Espectrofotómetro.....                                                                                                                               | 11 |
| Figura 7. Actinometría química.....                                                                                                                            | 11 |
| Figura 8. Detalle, lámpara de vapor de mercurio con 2 posiciones de longitud de onda: 254 nm y 366 nm.....                                                     | 14 |
| Figura 9. Conjunto lámpara UV-LED.....                                                                                                                         | 15 |
| Figura 10. Conjunto lámpara LED visible.....                                                                                                                   | 16 |
| Figura 11. Curva de rendimiento actinométrico.....                                                                                                             | 17 |
| Figura 12. Placas Petri Chromocult® Coliformes Agar con bacterias.....                                                                                         | 19 |
| Figura 13. Material para cultivo en campana de flujo laminar.....                                                                                              | 22 |
| Figura 14. Potencia de irradiación frente a potencia de consumo de las lámparas UV-LED... ..                                                                   | 24 |
| Figura 15. Comparativa aplicación de catalizador consumo de energía.....                                                                                       | 28 |
| Figura 16. Curva de calibrado para lámpara UV convencional 254nm. 13,5W. Ensayo 1... ..                                                                        | 34 |
| Figura 17. Curva de calibrado para lámpara UV convencional 254nm. 13,5W. Ensayo 2.....                                                                         | 35 |
| Figura 18. Curva de calibrado para lámpara UV convencional 254nm. 13,5W. Ensayo 3.....                                                                         | 36 |
| Figura 19. Curva de calibrado para lámpara UV convencional 366nm. 13,5W. Ensayo 1.....                                                                         | 37 |
| Figura 20. Curva de calibrado para lámpara UV convencional 366nm. 13,5W. Ensayo 2.....                                                                         | 38 |
| Figura 21. Curva de calibrado para lámpara UV convencional 366nm. 13,5W. Ensayo 3.....                                                                         | 39 |
| Figura 22. Curva de calibrado para lámpara UV-LED 365nm. 8W. Ensayo 1.*10 LEDs.....                                                                            | 40 |
| Figura 23. Curva de calibrado para lámpara UV-LED 365nm. 8W. Ensayo 2.*10 LEDs.....                                                                            | 41 |
| Figura 24. Curva de calibrado para lámpara UV-LED 365nm. 8W. Ensayo 3.*10 LEDs.....                                                                            | 42 |
| Figura 25. Curva de calibrado para lámpara UV-LED 365nm. 13,5W. Ensayo 1.....                                                                                  | 43 |

## REDUCCIÓN DE PATÓGENOS EN AGUA DE CONSUMO Y REUTILIZADAS MEDIANTE APLICACIÓN DE LUZ ULTRAVIOLETA DE BAJO CONSUMO

|                                                                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 26. Curva de calibrado para lámpara UV-LED 365nm. 13,5W. Ensayo 2.....                                               | 44 |
| Figura 27. Curva de calibrado para lámpara UV-LED 365nm. 13,5W. Ensayo 3.....                                               | 45 |
| Figura 28. Curva de calibrado para lámpara LED visible. 29,25W.....                                                         | 46 |
| Figura 29. Curva de calibrado para lámpara UV-LED 365nm. 3,75W. Ensayo 1.....                                               | 47 |
| Figura 30. Curva de calibrado para lámpara UV-LED 385nm. 3,75W. Ensayo 1.....                                               | 48 |
| Figura 31. Curva de calibrado para lámpara UV-LED 395nm. 3,75W. Ensayo 1.....                                               | 49 |
| Figura 32. Curva de calibrado para lámpara UV-LED 385nm. 13,5W. Ensayo 1.....                                               | 50 |
| Figura 33. Curva de calibrado para lámpara UV-LED 395nm. 13,5W. Ensayo 1.....                                               | 51 |
| Figura 34. Curva de calibrado para lámpara UV-LED 365nm. 8W. Ensayo 1. *8 LEDs.....                                         | 52 |
| Figura 35. Curva de calibrado para lámpara UV-LED 385nm. 8W. Ensayo 1.....                                                  | 53 |
| Figura 36. Curva de calibrado para lámpara UV-LED 395nm. 8W. Ensayo 1.....                                                  | 54 |
| Figura 37. Gráfica Intensidad relativa en el espectro visible.....                                                          | 57 |
| Figura 38. Curva de calibrado patrón para calculo DQO.....                                                                  | 66 |
| Figura 39. Nº de colonias en agar rojo, respecto al tiempo de desinfección. UV-LED 365nm, 8W 10 LEDs.....                   | 68 |
| Figura 40. Nº de colonias en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. UV-LED 365nm, 8W 10 LEDs.....               | 69 |
| Figura 41. Porcentaje de supervivencia en agar rojo, respecto al tiempo de desinfección. UV-LED 365nm, 8W 10 LEDs.....      | 69 |
| Figura 42. Porcentaje de supervivencia en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. UV-LED 365nm, 8W, 10 LEDs..... | 70 |
| Figura 43. Logaritmo de inactivación en agar rojo, respecto al tiempo de desinfección. UV-LED 365nm, 8W, 10 LEDs.....       | 70 |
| Figura 44. Logaritmo de inactivación en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. UV-LED 365nm, 8W, 10 LEDs.....   | 71 |
| Figura 45. Nº de colonias en agar rojo, respecto al tiempo de desinfección. UV convencional 366nm, 13,5W.....               | 72 |
| Figura 46. Nº de colonias en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. UV convencional 366nm, 13,5W.....           | 72 |
| Figura 47. Porcentaje de supervivencia en agar rojo, respecto al tiempo de desinfección. UV convencional 366nm, 13,5W.....  | 73 |

## REDUCCIÓN DE PATÓGENOS EN AGUA DE CONSUMO Y REUTILIZADAS MEDIANTE APLICACIÓN DE LUZ ULTRAVIOLETA DE BAJO CONSUMO

|                                                                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 48. Porcentaje de supervivencia en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. UV convencional 366nm, 13,5W.....              | 73 |
| Figura 49. Logaritmo de inactivación en agar rojo, respecto al tiempo de desinfección. UV convencional 366nm, 13,5W.....                    | 74 |
| Figura 50. Logaritmo de inactivación en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. UV convencional 366nm, 13,5W.....                | 74 |
| Figura 51. Nº de colonias en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. UV convencional 254nm, 13,5W.....                           | 75 |
| Figura 52. Porcentaje de supervivencia en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. UV convencional 254nm, 13,5W.....              | 76 |
| Figura 53. Logaritmo de inactivación en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. UV convencional 254nm, 13,5W.....                | 76 |
| Figura 54. Nº de colonias en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. UV-LED 365nm, 13,5W.....                                    | 77 |
| Figura 55. Porcentaje de supervivencia en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. UV-LED 365nm, 13,5W.....                       | 78 |
| Figura 56. Logaritmo de inactivación en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. UV-LED 365nm, 13,5W.....                         | 78 |
| Figura 57. Nº de colonias en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. UV-LED 385nm, 8W.....                                       | 79 |
| Figura 58. Porcentaje de supervivencia en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. UV-LED 385nm, 8W.....                          | 79 |
| Figura 59. Logaritmo de inactivación en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. UV-LED 385nm, 8W.....                            | 80 |
| Figura 60. Nº de colonias en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. UV-LED 395nm, 8W.....                                       | 81 |
| Figura 61. Porcentaje de supervivencia en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. UV-LED 395nm, 8W.....                          | 81 |
| Figura 62. Logaritmo de inactivación en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. UV-LED 395nm, 8W.....                            | 82 |
| Figura 63. Nº de colonias en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. UV-LED 385nm, 8W. 0,01g TiO <sub>2</sub> .....              | 83 |
| Figura 64. Porcentaje de supervivencia en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. UV-LED 385nm, 8W. 0,01g TiO <sub>2</sub> ..... | 83 |

## REDUCCIÓN DE PATÓGENOS EN AGUA DE CONSUMO Y REUTILIZADAS MEDIANTE APLICACIÓN DE LUZ ULTRAVIOLETA DE BAJO CONSUMO

|                                                                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 65. Logaritmo de inactivación en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. UV-LED 385nm, 8W. 0,01g TiO <sub>2</sub> .....         | 84 |
| Figura 66. Nº de colonias en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. LED visible, 29,25W.....                                          | 84 |
| Figura 67. Porcentaje de supervivencia en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. LED visible, 29,25W.....                             | 85 |
| Figura 68. Logaritmo de inactivación en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. LED visible, 29,25W.....                               | 85 |
| Figura 69. Nº de colonias en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. UV-LED 395nm, 8W. 0,01g TiO <sub>2</sub> .....                    | 86 |
| Figura 70. Porcentaje de supervivencia en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. UV-LED 395nm, 8W. 0,01g TiO <sub>2</sub> .....       | 86 |
| Figura 71. Logaritmo de inactivación en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. UV-LED 395nm, 8W. 0,01g TiO <sub>2</sub> .....         | 87 |
| Figura 72. Nº de colonias en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. LED visible, 29,25W. 0,01g TiO <sub>2</sub> .....                 | 88 |
| Figura 73. Porcentaje de supervivencia en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. LED visible, 29,25W. 0,01g TiO <sub>2</sub> .....    | 88 |
| Figura 74. Logaritmo de inactivación en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. LED visible, 29,25W. 0,01g TiO <sub>2</sub> .....      | 89 |
| Figura 75. Nº de colonias en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. UV-LED 385nm, 8W. 0,01g TiO <sub>2</sub> (P-25).....              | 90 |
| Figura 76. Porcentaje de supervivencia en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. UV-LED 385nm, 8W. 0,01g TiO <sub>2</sub> (P-25)..... | 90 |
| Figura 77. Logaritmo de inactivación en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. UV-LED 385nm, 8W. 0,01g TiO <sub>2</sub> (P-25).....   | 91 |
| Figura 78. Nº de colonias en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. UV-LED 395nm, 8W. 0,01g TiO <sub>2</sub> (P-25).....              | 92 |
| Figura 79. Porcentaje de supervivencia en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. UV-LED 395nm, 8W. 0,01g TiO <sub>2</sub> (P-25)..... | 92 |
| Figura 80. Logaritmo de inactivación en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. UV-LED 395nm, 8W. 0,01g TiO <sub>2</sub> (P-25).....   | 93 |
| Figura 81. Nº de colonias en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. UV-LED 385nm, 8W. 0,02g TiO <sub>2</sub> (P-25).....              | 94 |

## REDUCCIÓN DE PATÓGENOS EN AGUA DE CONSUMO Y REUTILIZADAS MEDIANTE APLICACIÓN DE LUZ ULTRAVIOLETA DE BAJO CONSUMO

|                                                                                                                                                    |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 82. Porcentaje de supervivencia en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. UV-LED 385nm, 8W. 0,02g TiO <sub>2</sub> (P-25).....  | 94  |
| Figura 83. Logaritmo de inactivación en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. UV-LED 385nm, 8W. 0,02g TiO <sub>2</sub> (P-25).....    | 95  |
| Figura 84. Nº de colonias en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. UV-LED 395nm, 8W. 0,02g TiO <sub>2</sub> (P-25).....               | 96  |
| Figura 85. Porcentaje de supervivencia en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. UV-LED 395nm, 8W. 0,02g TiO <sub>2</sub> (P-25).....  | 96  |
| Figura 86. Logaritmo de inactivación en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. UV-LED 395nm, 8W. 0,02g TiO <sub>2</sub> (P-25).....    | 97  |
| Figura 87. Nº de colonias en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. UV-LED 365nm, 8W. 8* LEDs.....                                     | 98  |
| Figura 88. Porcentaje de supervivencia en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. UV-LED 365nm, 8W. 8* LEDs.....                        | 98  |
| Figura 89. Logaritmo de inactivación en agar amarillo, respecto al tiempo de desinfección. UV-LED 365nm, 8W. 8* LEDs.....                          | 99  |
| Figura 90. Capacidad de inactivación para <i>E. coli</i> y coliformes totales de UV-LED 365nm. 8W, en Petri amarilla.....                          | 100 |
| Figura 91. Capacidad de inactivación para <i>E. coli</i> y coliformes totales de UV-LED 365nm. 8W, en Petri roja.....                              | 100 |
| Figura 92. Capacidad de inactivación para <i>E. coli</i> y coliformes totales de UV convencional 366nm. 13,5W, en Petri amarilla.....              | 100 |
| Figura 93. Capacidad de inactivación para <i>E. coli</i> y coliformes totales de UV convencional 366nm. 13,5W, en Petri roja.....                  | 101 |
| Figura 94. Capacidad de inactivación para <i>E. coli</i> y coliformes totales de UV convencional 254nm. 13,5W, en Petri amarilla.....              | 101 |
| Figura 95. Capacidad de inactivación para <i>E. coli</i> y coliformes totales de UV-LED 365nm. 13,5W, en Petri amarilla.....                       | 101 |
| Figura 96. Capacidad de inactivación para <i>E. coli</i> y coliformes totales de UV-LED 385nm. 8W, en Petri amarilla.....                          | 102 |
| Figura 97. Capacidad de inactivación para <i>E. coli</i> y coliformes totales de UV-LED 395nm. 8W, en Petri amarilla.....                          | 102 |
| Figura 98. Capacidad de inactivación para <i>E. coli</i> y coliformes totales de UV-LED 385nm. 8W. 0,01g TiO <sub>2</sub> , en Petri amarilla..... | 102 |

## REDUCCIÓN DE PATÓGENOS EN AGUA DE CONSUMO Y REUTILIZADAS MEDIANTE APLICACIÓN DE LUZ ULTRAVIOLETA DE BAJO CONSUMO

|                                                                                                                                                           |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 99. Capacidad de inactivación para <i>E. coli</i> y coliformes totales de UV-LED 395nm. 8W. 0,01g TiO <sub>2</sub> , en Petri amarilla.....        | 103 |
| Figura 100. Capacidad de inactivación para <i>E. coli</i> y coliformes totales de UV-LED visible. 29,25W, en Petri amarilla.....                          | 103 |
| Figura 101. Capacidad de inactivación para <i>E. coli</i> y coliformes totales de UV-LED visible. 29,25W, 0.01g TiO <sub>2</sub> en Petri amarilla.....   | 103 |
| Figura 102. Capacidad de inactivación para coliformes totales de UV-LED 385 y 395nm. 8W. 0,01g TiO <sub>2</sub> (P-25), en Petri amarilla.....            | 104 |
| Figura 103. Capacidad de inactivación para <i>E. coli</i> y coliformes totales de UV-LED 385nm. 8W. 0,02g TiO <sub>2</sub> (P-25), en Petri amarilla..... | 104 |
| Figura 104. Capacidad de inactivación para <i>E. coli</i> y coliformes totales de UV-LED 395nm. 8W. 0,02g TiO <sub>2</sub> (P-25), en Petri amarilla..... | 104 |
| Figura 105. Capacidad de inactivación para <i>E. coli</i> y coliformes totales de UV-LED 365nm. 8W (8*). Con 8 LEDs en Petri amarilla.....                | 105 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|                                                                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1. Normativa uso de aguas.....                                                                                     | 7  |
| Tabla 2. Rendimiento cuántico en función de la longitud de onda para la producción de iones ferrosos.....                | 13 |
| Tabla 3. Diferenciación de UFC según su color.....                                                                       | 18 |
| Tabla 4. Potencia de irradiación, de consumo y eficiencia de las lámparas UV.....                                        | 23 |
| Tabla 5. Potencia irradiada, de consumo y eficiencia para la lámpara LED visible.....                                    | 25 |
| Tabla 6. Comparativa entre energía de irradiación y de consumo para desinfección de <i>E. coli</i> .....                 | 27 |
| Tabla 7. Comparativa entre energía de irradiación y de consumo para desinfección de coliformes.....                      | 27 |
| Tabla 8. Parámetros para el cálculo de potencia de irradiación para lámpara UV convencional 254nm. 13,5W. Ensayo 1.....  | 34 |
| Tabla 9. Parámetros para el cálculo de potencia de irradiación para lámpara UV convencional 254nm. 13,5W. Ensayo 2.....  | 35 |
| Tabla 10. Parámetros para el cálculo de potencia de irradiación para lámpara UV convencional 254nm. 13,5W. Ensayo 3..... | 36 |
| Tabla 11. Parámetros para el cálculo de potencia de irradiación para lámpara UV convencional 366nm. 13,5W. Ensayo 1..... | 37 |
| Tabla 12. Parámetros para el cálculo de potencia de irradiación para lámpara UV convencional 366nm. 13,5W. Ensayo 2..... | 38 |
| Tabla 13. Parámetros para el cálculo de potencia de irradiación para lámpara UV convencional 366nm. 13,5W. Ensayo 3..... | 39 |
| Tabla 14. Parámetros para el cálculo de potencia de irradiación para lámpara UV-LED 365nm. 8W. Ensayo 1.*10 LEDs.....    | 40 |
| Tabla 15. Parámetros para el cálculo de potencia de irradiación para lámpara UV-LED 365nm. 8W. Ensayo 2.*10 LED.....     | 41 |
| Tabla 16. Parámetros para el cálculo de potencia de irradiación para lámpara UV-LED 365nm. 8W. Ensayo 3.*10 LEDs.....    | 42 |
| Tabla 17. Parámetros para el cálculo de potencia de irradiación para lámpara UV-LED 365nm. 13,5W. Ensayo 1.....          | 43 |
| Tabla 18. Parámetros para el cálculo de potencia de irradiación para lámpara UV-LED 365nm. 13,5W. Ensayo 2.....          | 44 |

## REDUCCIÓN DE PATÓGENOS EN AGUA DE CONSUMO Y REUTILIZADAS MEDIANTE APLICACIÓN DE LUZ ULTRAVIOLETA DE BAJO CONSUMO

|                                                                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 19. Parámetros para el cálculo de potencia de irradiación para lámpara UV-LED 365nm. 13,5W. Ensayo 3.....            | 45 |
| Tabla 20. Parámetros para el cálculo de potencia de irradiación para lámpara LED visible. 29,25W.....                      | 46 |
| Tabla 21. Parámetros para el cálculo de potencia de irradiación para lámpara UV-LED 365nm. 3,75W. Ensayo 1.....            | 47 |
| Tabla 22. Parámetros para el cálculo de potencia de irradiación para lámpara UV-LED 385nm. 3,75W. Ensayo 1.....            | 48 |
| Tabla 23. Parámetros para el cálculo de potencia de irradiación para lámpara UV-LED 395nm. 3,75W. Ensayo 1.....            | 49 |
| Tabla 24. Parámetros para el cálculo de potencia de irradiación para lámpara UV-LED 385nm. 13,5W. Ensayo 1.....            | 50 |
| Tabla 25. Parámetros para el cálculo de potencia de irradiación para lámpara UV-LED 395nm. 13,5W. Ensayo 1.....            | 51 |
| Tabla 26. Parámetros para el cálculo de potencia de irradiación para lámpara UV-LED 365nm. 8W. Ensayo 1. *8 LEDs.....      | 52 |
| Tabla 27. Parámetros para el cálculo de potencia de irradiación para lámpara UV-LED 385nm. 8W. Ensayo 1.....               | 53 |
| Tabla 28. Parámetros para el cálculo de potencia de irradiación para lámpara UV-LED 395nm. 8W. Ensayo 1.....               | 54 |
| Tabla 29. Potencia de irradiación lámpara UV convencional a 254 y 366nm de longitud de onda.....                           | 55 |
| Tabla 30. Potencia de irradiación lámpara UV-LED a 365nm. *Con 10 LEDs.....                                                | 55 |
| Tabla 31. Potencia de irradiación lámpara UV-LED a 365nm de longitud de onda. 13,5W y LED visible 29,25W. *Con 8 LEDs..... | 55 |
| Tabla 32. Potencia de irradiación lámpara UV-LED a 365, 385, 395nm a 3,75W.....                                            | 55 |
| Tabla 33. Potencia de irradiación lámpara UV-LED a 365, 385, 395nm a 8W.*Con 8 LEDs.....                                   | 56 |
| Tabla 34. Potencia de irradiación lámpara UV-LED a 385, 395nm a 8W.....                                                    | 56 |
| Tabla 35. Composición medio de cultivo m-FC Agar.....                                                                      | 58 |
| Tabla 36. Coloración de colonias en m-FC Agar.....                                                                         | 59 |
| Tabla 37. Composición medio de cultivo Chromocult® Coliformes Agar.....                                                    | 61 |
| Tabla 38. Coloración de colonias en Chromocult® Coliformes Agar.....                                                       | 62 |

REDUCCIÓN DE PATÓGENOS EN AGUA DE CONSUMO Y REUTILIZADAS MEDIANTE APLICACIÓN DE LUZ ULTRAVIOLETA DE BAJO CONSUMO

|                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 39. Curva de calibrado DQO.....                              | 65 |
| Tabla 40. Valores de DQO de las muestras de agua.....              | 66 |
| Tabla 41. Valores sólidos en muestras de agua.....                 | 66 |
| Tabla 42. Valores pH en muestras de agua.....                      | 67 |
| Tabla 43. Valores conductividad eléctrica en muestras de agua..... | 67 |