

**EFFECTO DE LA RADIACIÓN UV-C SOBRE LA ACTIVIDAD MICROBIANA EN
JUGO DE CAÑA DE AZÚCAR**

MARLY YESENIA SOLÍS NARVÁEZ

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
SANTIAGO DE CALI**

2024

**EFFECTO DE LA RADIACIÓN UV-C SOBRE LA ACTIVIDAD MICROBIANA EN
JUGO DE CAÑA DE AZÚCAR**

MARLY YESENIA SOLÍS NARVÁEZ

**PROYECTO DE GRADO PRESENTADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO**

DIRECTORES:

JUAN SEBASTIÁN GUERRERO PÉREZ, PhD.

LINA MARCELA ARÉVALO HURTADO, MSc.

UNIVERSIDAD DEL VALLE

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

SANTIAGO DE CALI

2024

AGRADECIMIENTOS

A mi madre y familia por su apoyo incondicional durante mi formación profesional.

Al centro de investigación CENICAÑA por permitirme realizar mi práctica profesional y utilizar sus instalaciones y recursos para el desarrollo de este proyecto.

A Paula Andrea Osorio por su apoyo y conocimientos aplicados en este proyecto, además, por su motivación y confianza que me impulsaron laboral y personalmente.

Al profesor Juan Sebastián Guerrero por su disponibilidad y amabilidad como director de este proyecto.

Marly Y. Solís Narváez

RESUMEN

La producción de azúcar enfrenta retos importantes debido a impurezas que degradan la sacarosa y disminuyen la eficiencia del proceso, entre ellas la presencia de microorganismos. Para mitigar estos efectos se han utilizado métodos térmicos y químicos, sin embargo, la búsqueda de alternativas más sostenibles y limpias impulsa el interés en tecnologías como la radiación UV-C. En este estudio se determinó el efecto de la radiación UV-C, a longitud de onda de 254 nm, como alternativa de tratamiento no térmico, sobre la actividad microbiana en corrientes de proceso, jugo filtrado, retornos dulces y jugo claro, utilizando potencias de 5, 7 y 11W. Para determinar el impacto del tratamiento en variables como pH, brix, color, turbidez, ácido láctico y metabolitos, se realizaron pruebas de exposición en tiempos de 1 a 4 h, en un biorreactor batch con 8,5 L de muestra, con agitación constante de 400 rpm y adaptado con la lámpara germicida sumergible. También se realizó un montaje con 2,5 L de muestra en un equipo Shacker simulando las condiciones del biorreactor para comparar la eficiencia del tratamiento. La temperatura en retornos dulces fue de 35°C, mientras que en jugo claro y jugo filtrado fue de 50°C, el máximo tolerable por las lámparas. El tiempo de muestreo varió entre 8 a 30 min, en cada toma se extrajeron 150 mL, divididas en 3 tubos falcon de 50 mL y se refrigeraron a -30°C para las mediciones fisicoquímicas y a -80°C para las mediciones de metabolitos y ácidos orgánicos en HPLC.

Los resultados muestran que el tratamiento con luz UV-C tiene efectos mínimos sobre el brix y color, sugiriendo que no altera las características fisicoquímicas del jugo. Se observó mayor variabilidad en mediciones relacionadas con la actividad microbiana como ácido láctico y manitol, especialmente en los tratamientos con la potencia más baja, 5W. Los análisis microbiológicos realizados, incluyendo electroforesis en gel de agarosa para evaluar el daño en el ADN de los microorganismos, evidenciaron decrecimiento en la concentración de ADN de las muestras, indicando que la radiación UV-C es efectiva en la reducción de la actividad microbiana. El estudio señala la necesidad de ajustar variables operativas como el volumen y turbidez, ya que son factores que limitan la penetración de la luz UV, alterando su eficiencia. La radiación UV-C es una tecnología prometedora para el control de la actividad microbiana, aunque se requieren más estudios para su aplicación a escala industrial.

Palabras claves: Radiación UV-C, actividad microbiana, jugo de caña, electroforesis.

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	3
RESUMEN	4
CONTENIDO	5
LISTA DE TABLAS	7
LISTA DE FIGURAS.....	7
1. INTRODUCCIÓN	8
1.1. Objetivos	9
1.1.1. Objetivo general	9
1.1.2. Objetivos específicos	9
2. MARCO CONCEPTUAL	9
2.1. Cenicaña	9
2.2. Proceso de producción de azúcar	10
2.2. Estación de clarificación de jugo.....	12
2.3. Impurezas microbiológicas presentes en el jugo de caña.....	12
2.4. Radiación UV-C	13
2.5. Factores que influyen en la eficiencia de la irradiación UV-C	14
3. ANTECEDENTES.....	15
4. MATERIALES Y MÉTODOS	17
4.2. Materia prima.....	17
4.3. Caracterización de las muestras	18
4.4. Descripción del equipo	19
4.5. Limpieza del equipo y materiales	21
4.6. Efecto de la potencia y tiempo de exposición sobre materiales de proceso	21

4.7.	Pruebas de aplicación de radiación UV-C.....	22
4.8.	Condiciones para mejorar la eficiencia sobre una matriz	24
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	24
5.1.	Caracterización de las corrientes de proceso	24
5.2.	Cálculo del dosaje y determinación del tiempo de exposición.....	28
5.3.	Principales factores influyentes en la eficiencia de la tecnología UV	28
5.4.	Uso de la radiación UV-C sobre corrientes de proceso	29
5.5.	Efecto de la luz UV-C sobre jugo filtrado	30
5.6.	Efecto de la luz UV-C sobre retornos dulces.....	32
5.7.	Efecto de la luz UV-C sobre jugo claro.....	34
5.8.	Análisis microbiológico	37
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	38
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	40
	ANEXOS	43

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Pruebas de exposición a radiación UV-C.	21
Tabla 2. Caracterización fisicoquímica del jugo filtrado.....	25
Tabla 3. Caracterización fisicoquímica de los retornos dulces.....	26
Tabla 4. Caracterización fisicoquímica del jugo claro.	27
Tabla 6. Dosaje requerido para inactivación de diferentes microorganismos. Tomado de: Correa, et al., 2020.	28
Tabla 7. Dosaje aplicado por cada lámpara en relación con el tiempo de exposición.....	28

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Proceso de producción de azúcar. Fuente. Cenicaña	11
Figura 2. Estación de clarificación y filtración de jugo. Fuente: Alberto, 2014.	12
Figura 3. Espectro electromagnético. Fuente: Christen et al., 2013.....	14
Figura 5. Montaje de control. Fuente: Propia.....	20
Figura 6. Diagrama de flujo del proceso de aplicación de luz UV-C sobre diferentes matrices. Fuente. Propia.....	23
Figura 7. Gráficos de resultados de las variables (a) pH, (b) Brix, (c) Ácido láctico y (d) color. Fuente. Propia.....	31
Figura 8. Variaciones en azúcares y metabolitos medidos (a) sacarosa, (b) fructosa y (c) azúcares totales. Fuente. Propia.	32
Figura 9. Variaciones en los parámetros medidos durante el tratamiento (a) ácido láctico (kit), (b) color, (c) manitol, (d) ácido acético y (e) ácido láctico (HPLC). Fuente. Propia.	33
Figura 10. Variaciones en los parámetros medidos durante el tratamiento (a) color, (b) ácido láctico (kit), (c) manitol, (d) ácido láctico (HPLC) y (e) ácido acético. Fuente. Propia.	35
Figura 11. Resultado de la electroforesis en gel de agarosa de las muestras extraídas. Fuente. Propia.	37

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, Colombia es el 4° productor de azúcar de América Latina, en 2022 produjo alrededor de 2.09 millones de toneladas de azúcar, de los cuales 1.4 millones de toneladas se destinan al consumo interno, mientras que un aproximado de 640.000 toneladas son exportadas. Sin embargo, las cifras de producción se han visto afectadas por el fenómeno de La Niña que trae lluvias excesivas al país, lo cual impide desarrollar normalmente el cultivo y la cosecha (Asocaña, 2022).

En Colombia, la producción de azúcar se encuentra centralizada en el valle geográfico del río Cauca debido a sus ventajas climáticas y agrícolas para el cultivo de la caña de azúcar. Esta planta se considera materia prima en la fabricación de productos como papel, abono, bioetanol, un combustible renovable y de origen natural y energía eléctrica, obtenida de la combustión de bagazo. El cultivo de la caña de azúcar impulsa la economía de los departamentos del Valle del Cauca, Cauca, Quindío, Risaralda, Caldas y Meta, generando empleo permanente y aportando a la estabilidad social y económica de la región (Alzate, 2021).

En general, una de las dificultades en la industria azucarera es la inversión de sacarosa en el jugo de caña que se genera desde la extracción en los molinos, donde se acumula fango y lodos, un medio ideal de propagación de microorganismos que destruyen la sacarosa como los del género *Leuconostoc*. El rendimiento de la sacarosa se ve afectado por cantidades relativamente pequeñas de dextrano, polisacárido producido por estos microorganismos, que aumenta la viscosidad, retarda la filtración y cristalización (Toto Guillén, 2021).

En este trabajo se pretende evaluar la radiación ultravioleta de onda corta (254 nm) como una alternativa de tratamiento no térmica para reducir la actividad microbiológica presente en corrientes del proceso de producción de azúcar sin comprometer la calidad de los materiales. Para ello se emplearán lámparas germicidas a diferentes potencias (5, 7 y 11 W) sobre materiales de proceso con el fin de identificar las variaciones en la eficiencia y su viabilidad como una solución que contribuya a procesos más limpios y sostenibles, minimizando el impacto ambiental sin comprometer los estándares de calidad en el proceso.

1.1.Objetivos

1.1.1. Objetivo general

- Determinar el efecto de la radiación UV-C como alternativa de tratamiento no térmico, sobre la actividad microbiana en corrientes de proceso de producción de azúcar.

1.1.2. Objetivos específicos

- Determinar el efecto de la potencia y el tiempo de exposición a radiación UV-C sobre la actividad microbiana en al menos dos (2) materiales del área de clarificación de jugo (jugo filtrado, retornos dulces y/o jugo claro).
- Identificar la corriente de proceso sobre la cual se genera una mayor reducción de la actividad microbiana con la aplicación de radiación UV-C.
- Establecer las condiciones del tratamiento que permita mejorar la eficiencia sobre la corriente de proceso con mayor disminución de actividad microbiana, en un sistema estático de irradiación UV-C.

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1. Cenicaña

El centro de investigación de la caña de azúcar de Colombia se constituyó como una corporación privada de carácter científico y tecnológico sin ánimo de lucro, en septiembre de 1977, por iniciativa de la Asociación de cultivadores de caña de azúcar de Colombia, Asocaña, y actualmente se encuentra financiada por donaciones directas de los ingenios azucareros Carmelita, Occidente, Incauca, La Cabaña, Manuelita, María Luisa, Mayagüez, Pichichí, Providencia, Riopaila-Castilla, Risaralda y Sancarlos, y sus proveedores de caña. También ofrece servicios especializados a ingenios y cultivadores de caña, y adelanta proyectos cofinanciados por entidades como Colciencias.

Cenicaña cuenta con un equipo de investigadores, auxiliares, personal de apoyo operativo y aprendices, comprometido con generar conocimiento y tecnologías que contribuyen al desarrollo y sostenibilidad del sector agroindustrial de la caña de azúcar en Colombia. Los programas de investigación que dirige son: Variedades, agronomía y procesos de fábrica, y

servicios especializados en información y documentación, tecnología informática, análisis económico y estadístico, cooperación técnica y transferencia de tecnología. Dentro de este contexto, en el programa de procesos de fábrica, se encuentra el proyecto de investigación “Impurezas” enfocado en la búsqueda de nuevas alternativas de tratamiento que permitan mejorar el proceso de producción de azúcar mitigando las impurezas presentes en las corrientes de proceso con el fin de mejorar la calidad del azúcar, la eficiencia y reducir los costos operativos.

2.2. Proceso de producción de azúcar

El proceso de producción de azúcar se da mediante una serie de etapas que involucra desde el trabajo en campo hasta su paso por la fábrica, donde se genera el azúcar comercial, además, se producen otros subproductos de valor agregado como el etanol y la energía.

El proceso da inicio en campo, donde la caña de azúcar es cortada y transportada a la fábrica, esta cosecha se realiza de manera manual o mediante maquinaria. Es importante que la caña se transporte y procese rápidamente para evitar pérdidas de sacarosa. Una vez en la fábrica, la caña pasa por el tándem de molinos que extrae el jugo y lo separa del bagazo que se emplea como combustible para las calderas. La extracción se realiza por compresión y el bagazo pasa de un molino a otro para extraer la mayor cantidad de jugo con ayuda de agua a alta temperatura.

El bagazo quemado en las calderas genera el vapor vivo empleado en los turbogeneradores que producen energía eléctrica suficiente para suplir el requerimiento de la planta y un excedente que se vende a la red pública. El vapor de escape generado se emplea en procesos de secado, evaporación y destilación en fábrica. Una vez extraído, el jugo es sometido al proceso de clarificación para eliminar las impurezas que contiene, para ello se calienta y se agrega cal que aglomera las impurezas y por su peso descenden al fondo del clarificador en forma de lodo. El lodo pasa a los filtros donde se agrega bagacillo para crear una consistencia firme y mejorar la filtración, con ayuda de agua a alta temperatura se extrae la mayor cantidad de sacarosa posible en la parte líquida y la torta sólida (cachaza) es enviada a compostaje.

El exceso de agua que contiene el jugo claro se elimina en el tren de evaporación de múltiple efecto. Los evaporadores concentran el jugo por medio de vacío y vapor generando un jarabe con alto contenido de sacarosa, la meladura. Posteriormente, la meladura se somete a

clarificación con ayuda de cal, un floculante y ácido para regular el pH. Las pequeñas impurezas restantes son eliminadas por flotación, burbujas de aire arrastran las impurezas y forman una torta de espuma en la superficie, la cual es removida.

En la etapa de cristalización, la meladura se introduce en los tachos, evaporadores de simple efecto que trabajan al vacío, y se pone en contacto con pequeños cristales de azúcar. La sacarosa se adhiere a los núcleos haciéndolos crecer hasta el tamaño adecuado para su extracción. El azúcar obtenido se separa mediante centrifugado, mientras que la meladura residual retorna al proceso para extraer la mayor cantidad posible de sacarosa. Finalmente, el azúcar se lava con agua caliente en los tachos para retirar toda la miel y el exceso de humedad de los cristales se retira en las secadoras rotatorias, donde los cristales se ponen en contacto con aire seco en contracorriente. Una vez seco, el azúcar se empaca para su comercialización. A continuación, la Figura 1 muestra el diagrama general del proceso de producción de azúcar.

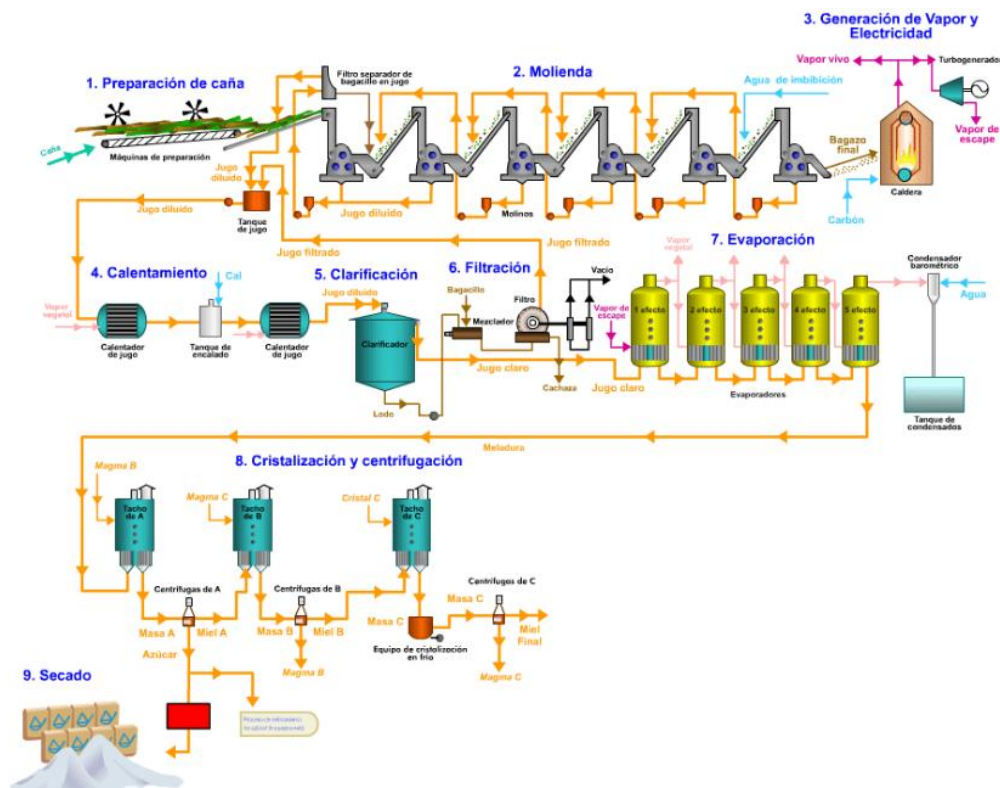


Figura 1. Proceso de producción de azúcar. Fuente. Cenicaña

2.2. Estación de clarificación de jugo

El jugo obtenido en el tándem de molinos contiene diferentes formas de basura (trash) propias de la caña como tierra, arena y bagacillo. El proceso de clarificación de jugo tiene como objetivo remover las impurezas contenidas en el jugo, para obtener jugo clarificado (Melgar, et al., 2014).

El jugo diluido proveniente de los calentadores llega a un tanque flash para presurizarlo y pasa a los clarificadores donde se mezcla con el floculante, haciendo que los sólidos en suspensión se aglomeren y precipiten por acción de la gravedad, obteniendo el jugo clarificado que pasa por una serie de filtros para remover las partículas de bagacillo que aún contiene, el precipitado se conoce como lodos y se adiciona bagacillo para pasarlos por un filtro y extraer la mayor cantidad de jugo posible. De esta etapa se obtiene el jugo filtrado que se lleva al tanque encalado para ser reprocesado (Alberto, 2014); en la figura 2 se muestra el diagrama general de una estación de clarificación de jugo. La corriente de retornos dulces se genera a lo largo de todo el proceso de fabricación de azúcar e incluye el agua utilizada para lavar los equipos, esta corriente se almacena en tanques para ser reprocesada posteriormente.

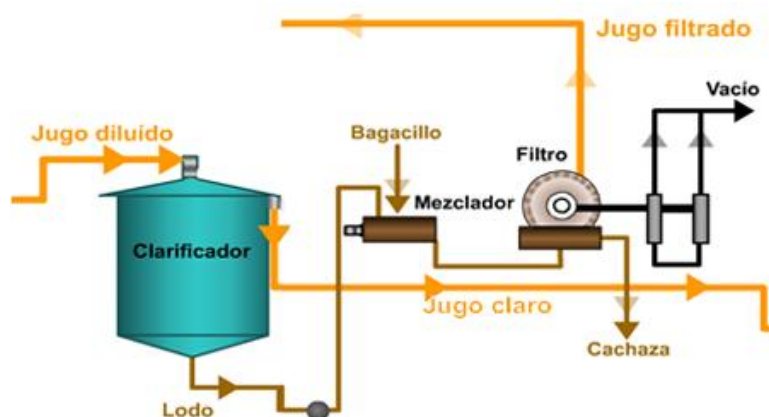


Figura 2. Estación de clarificación y filtración de jugo. Fuente: Alberto, 2014.

2.3. Impurezas microbiológicas presentes en el jugo de caña.

Las características fisicoquímicas del jugo están determinadas por los azúcares reductores presentes y las poblaciones microbiológicas que degradan la sacarosa, que también

influyen en el proceso de extracción. Debido a esto, los subproductos metabólicos son tomados como indicadores indirectos de las pérdidas de sacarosa en el proceso a pesar de que las pérdidas sean mayores a las que se pueden calcular en con base en indicadores, ya que están relacionados por otros factores ajenos a la actividad microbiana (Chumioque & Flores, 2016).

La etapa de extracción en el proceso de producción de azúcar presenta las condiciones favorables para el crecimiento de microorganismos. El jugo crudo que se extrae en los molinos presenta características físicas y químicas que lo convierten en un excelente sustrato para el desarrollo de gran variedad de microorganismos (Chumioque & Flores, 2016). Los macroorganismos contaminantes ingresan al proceso adheridos al tallo y hojas de la caña, pero no dentro del tallo. En el momento de la cosecha los extremos cortados del tallo se infectan con *Leuconostoc*, al entrar en contacto con el suelo y la flora de la planta, esta contaminación penetra rápidamente en el tallo y coloniza el tejido. Los microorganismos crecen de manera exponencial, alcanzando recuentos máximos de 10^7 a 10^8 células/ml dentro de los 3 a 4 días posteriores a la cosecha (Camacho, 2021).

Existen especies que se desarrollan con más frecuencia en el jugo, entre estas se destacan *Leuconostoc mesenteroides* y al *L. dextranicum*, y miembros de bacterias coliformes, tales como el *Enterobacter amnigenus*, *Rahnella sp.* o el *Enterobacter aerógenes*, siendo la primera de mayor incidencia en los ingenios azucareros. Otras especies notables de microorganismos son las levaduras de la especie *Saccharomyces sp.*, que produce etanol y *Clostridium thermosaccharolyticum*, que produce ácido butírico (Chumioque & Flores, 2016).

2.4. Radiación UV-C

La radiación ultravioleta, es una tecnología emergente mayormente utilizada en la purificación del agua en plantas de tratamiento; sin embargo, su uso se ha extendido hacia la industria alimentaria en la que se someten los alimentos líquidos a este tratamiento para prolongar su vida útil y a su vez conservar su calidad nutricional. También se ha utilizado en desinfección de aire y superficies dado que esta alternativa de tratamiento se realiza a bajas temperaturas, requiere menos espacio, tiene bajo costo y demanda poco mantenimiento; además

es fácil de incorporar en líneas de procesamiento y no necesita de una gran inversión para su implementación (Martínez, 2023).

La luz UV es la radiación electromagnética con longitud de onda mayor que los rayos X y más corta que la luz visible, comprende las longitudes de onda entre los 100 nm a 400 nm. Se encuentra dividida en cuatro regiones diferentes: UV-A: 300 - 400 nm, UV-B: 280 - 320 nm, UV-C: 200 - 280 nm y UV de vacío: 100 - 200 nm (Avendaño, 2023). La región UV-C, que tiene una alta energía, se conoce también como región de irradiación germicida, específicamente entre 250 y 270 nm y la eficiencia máxima para desinfección se encuentra a 254 nm (Christen et al., 2013).

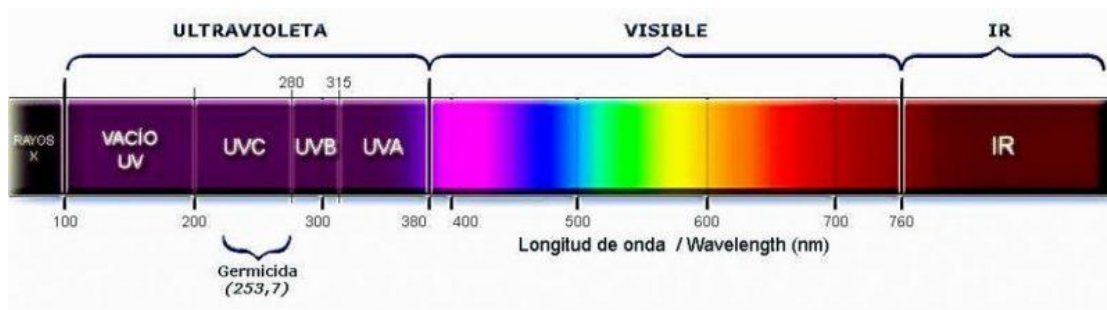


Figura 3. Espectro electromagnético. Fuente: Christen et al., 2013.

Esta tecnología presenta un alto efecto germicida dado que genera alteraciones que limitan las funciones metabólicas de los microorganismos impidiendo la reproducción, específicamente induce cambios físicos en los electrones y el rompimiento de enlaces en el ADN y ARN de la célula microbiana, promoviendo la formación de dímeros de pirimidina que eventualmente conducen a mutagénesis y muerte celular (Baysal, 2018). La longitud de onda de 254 nm es absorbida en un 85% por el núcleo de la célula y todos los microorganismos que contienen ADN como los virus, bacterias, mohos y esporas, son factibles de ser eliminados (Martínez, 2023).

2.5. Factores que influyen en la eficiencia de la irradiación UV-C

La eficacia de este método puede verse influenciada por diversos factores, tales como las características del jugo, las especies de microorganismos presentes y la cantidad de radiación aplicada. En el caso de alimentos líquidos, la eficacia de la radiación UV-C está condicionada

por factores como el color, turbidez, viscosidad, densidad óptica, pH y composición química (Guerrero & Barbosa, 2011).

Las características como el color y la turbidez aportan un alto coeficiente de absorción, lo que indica que interfieren con el paso de la luz a través del líquido, impidiendo que esta llegue directamente a los microorganismos. El coeficiente de absorción (α) describe la atenuación de la intensidad de la luz que pasa por el material, por lo tanto, un valor alto de α reduce la eficacia antimicrobiana del tratamiento con luz UV-C en el alimento, independientemente del dosaje aplicado (Koutchma, 2009). Por lo general, para contrarrestar el efecto de estos dos factores se recomienda un Número de Reynolds superior a 4500 para garantizar el flujo turbulento y que cada volumen del líquido esté expuesto a la luz UV-C debido a la agitación.

Otro factor que afecta el rendimiento de la inactivación microbiana mediante la radiación UV-C es la naturaleza de los microorganismos presentes en el fluido a tratar. La estructura de la pared celular, su grosor, composición, presencia de proteínas absorbentes, así como diferencias en la estructura de los ácidos nucleicos y la capacidad de reparación, son propiedades que influyen en la sensibilidad de los microorganismos a la luz UV-C (Tran & Farid, 2004). Debido a la estructura de la pared celular y su mayor tamaño, las bacterias Gram positivas suelen ser más resistentes que las bacterias Gram negativas; además, los mohos y levaduras presentan una resistencia aún mayor que las bacterias, dado que su forma y tamaño más grandes requieren un dosaje más elevado para su inactivación (Avendaño, 2023).

El efecto germicida de la luz UV-C también se ve influenciado por la cepa microbiana, el estado del cultivo, la densidad del microorganismo y las características del medio de crecimiento. Según Souza & Koutchma (2021), el patrón de resistencia de las células microbianas a la luz UV-C varía de la siguiente manera: protozoos > virus > mohos > esporas bacterianas > levaduras > bacterias Gram positivas > bacterias Gram negativas.

3. ANTECEDENTES

Estudios previos han evaluado la viabilidad de la radiación ultravioleta como una alternativa de tratamiento para la conservación de jugos de frutas y fluidos similares, sobre la inactivación de diferentes microorganismos. A continuación, se muestran algunos resultados relevantes para este estudio.

El tratamiento con radiación UV-C puede ser considerado como una alternativa a la pasteurización térmica; se ha evaluado su efecto sobre la descontaminación microbiológica y algunas características del jugo de melón cantaloupe, durante el almacenamiento refrigerado. El jugo se inoculó con *Listeria innocua* y esporas de *Alicyclobacillus acidoterrestris*, indicadores de deterioro, y se enumeraron los mesófilos totales, levaduras y mohos. Se determinó que se necesitan entre 5 y 20 minutos para reducir 3,7 y 4,7 unidades logarítmicas de *L. innocua* y *A. Acidoterrestris*, respectivamente. Después de 13 días de refrigeración el jugo conservó el color, contenido fenólico total y actividad antioxidante y no se observó crecimiento de mohos ni levaduras. Esta alternativa fue aprobada por la Administración y Medicamentos de Alimentos de EE. UU como un método confiable a la pasteurización térmica de productos de jugo de fruta fresca (Koutchma, 2009). No obstante, la eficacia de este método depende de las características intrínsecas del jugo y de dosaje aplicado. Para la implementación en grandes volúmenes de jugo, se recomienda la experimentación en sistemas continuos para ampliar la tecnología a escala industrial (Fundo et al., 2019).

En un estudio reciente, se investigó el efecto de la radiación UV en diferentes dosis y el proceso de pasteurización en la conservación de la calidad del jugo de Longan, una fruta exótica similar al Lychee (Kijpatanasilp et al., 2023). Durante el experimento, el jugo inoculado con *E. Coli* fue sometido tanto a la pasteurización como a la radiación UV en dosis que oscilaron entre 4.68 y 149.8 J/cm². Se observó una reducción significativa del recuento microbiano, con una disminución de 2.80 y 3.63 unidades logarítmicas en comparación con el control no tratado. Además, el jugo tratado con radiación UV no experimentó cambios significativos en parámetros como el pH, los sólidos totales, la acidez total, la turbidez y el color, incluso con la exposición a la dosis más alta. Al refrigerarse, este jugo también mostró un crecimiento microbiano reducido. A lo largo de un periodo de almacenamiento de 15 días, se observó un aumento gradual en los recuentos totales de bacterias, levaduras y mohos; sin embargo, el jugo de longan mantuvo una vida útil aceptable de 12 días.

Por otro lado, algunos autores han encontrado que la eficiencia de la radiación UV-C sobre jugos de frutas se ve comprometida debido a la baja capacidad de penetración de la luz. Establecer un tratamiento estándar para los jugos de frutas puede resultar complicado, ya que la penetración de la luz UV-C está influenciada por condiciones de la matriz como la presencia de

pulpa o si el jugo ha sido procesado o clarificado. Sin embargo, se destaca la alta eficiencia de la luz UV-C en la inactivación de esporas bacterianas en la cáscara de la fruta, siendo esta la principal fuente de esporas bacterianas presentes en los jugos. La reducción de las esporas bacterianas en la cáscara podría disminuir su entrada en las plantas de procesamiento (Colás-Medà et al., 2021).

Teniendo en cuenta que las características de la matriz influyen en la eficiencia del tratamiento con luz UV, la revisión realizada por Guerrero et al, (2021) en su investigación ofrece una clasificación de productos alimenticios líquidos basada en su color y contenido de partículas sólidas. Estos productos incluyen jugos de fruta, néctar de fruta, líquidos de frutas naturales y alimentos líquidos tipo leche. Se dividen en categorías como Incoloros UV transparentes: agua y refrescos incoloros; coloreados UV transparentes: zumos de manzana, arándanos, uva y otros; blancos: leche de vaca y leches de arroz, coco y otras; turbios sin color: agua de coco, savia de agave y otros; y turbios con color: zumo de naranja, piña, limón, mandarina, néctar de mango, papaya, etc. Además, se detalla el dosaje aplicado para lograr el mejor efecto en cuanto a reducción de microorganismos en diferentes matrices. Finalmente, se sugiere ampliar la investigación de la aplicación de esta nueva tecnología en las industrias y estandarizar la dosis requerida según las características de cada matriz (Guerrero & Ochoa, 2021).

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.2. Materia prima

Se solicitó una muestra representativa de las corrientes de proceso jugo filtrado, jugo claro y retornos dulces a ingenios aledaños de la región. Para las pruebas de exposición a radiación UV con las tres potencias existentes (5, 7 y 11 W), fue necesario recolectar una muestra aproximada de 30 L de cada matriz.

En el laboratorio, para homogeneizar la muestra, se empleó un recipiente de 30 L en que se vació el contenido de los recipientes empleados para la recolección en el ingenio y se agitó para posteriormente dosificar la muestra en tres partes de mínimo 10 L para la aplicación del tratamiento con las tres potencias.

4.3. Caracterización de las muestras

Las variables seleccionadas para conocer las condiciones de la muestra antes del tratamiento fueron color, turbiedad, pH, Brix, conductividad, ácido láctico y metabolitos como azúcares reales y ácidos orgánicos. Estas mismas variables se monitorearon a lo largo de toda la experimentación. De ellas, color, turbiedad, Brix y conductividad se utilizaron para evaluar la calidad del jugo, mientras que el pH, ácido láctico, metabolitos y ácidos orgánicos se emplearon como indicadores indirectos de la actividad microbiológica presente. Aunque existen otros métodos más directos, como el recuento en placa, no fue posible implementarlos debido a limitaciones de tiempo y la gran cantidad de muestras a procesar. Para el análisis, se emplearon los siguientes equipos y metodologías:

Color (UI) y Turbiedad (NTU): La intensidad del color y la turbiedad de las muestras se midieron siguiendo el método para determinación de color y turbiedad en jugos por espectrofotometría establecido por centro de investigación CENICAÑA. Para ello se emplearon un espectrofotómetro UV-VIS DR6000 de la marca HACH en el que se midió la absorbancia a una longitud de onda de 420 nm y un turbidímetro portátil de la marca HACH modelo 2100Q01 con un rango de medición de 0-1000 NTU y que se calibró antes de las mediciones. En esta última variable, las muestras de jugo claro se colocaron en el vial de vidrio y se midió la dispersión de la luz; para jugo filtrado y retornos dulces fue necesario realizar diluciones desde 1/5 hasta 1/60 debido a la presencia de sólidos que arrojan valores fuera del rango de medición del equipo.

pH: El pH de las muestras se determinó con un medidor multiparamétrico para pH, ORP y EC, TDS, NaCl de la marca HANNA Instruments modelo HI-2550. Las mediciones se realizaron introduciendo el electrodo directamente sobre las muestras y el equipo se calibró previamente con las soluciones estándar.

°Brix: El valor de Brix de las muestras se determinó usando un refractómetro automático Atago, modelo SMART-1. La muestra se pone sobre la superficie del prisma y se registra el valor mostrado por el equipo.

Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$): La conductividad de las muestras se determinó con un conductímetro METTLER TOLEDO modelo FiveGo F3. Las mediciones se realizaron directamente sobre las muestras y el equipo se calibró previamente con la solución estándar.

Ácido láctico (mg/L): Las mediciones en las muestras se realizaron empleando un reflectómetro RQflex20 de la marca MERCK que cuenta con un rango de medición de 3 a 60 mg/L . Las tiras reactivas del kit se introducen directamente sobre la muestra o su dilución en caso de ser necesario.

Metabolitos: Se enviaron las muestras al laboratorio de cromatografía del centro de investigación CENICANÑA, donde se empleó la técnica de cromatografía líquida HPLC para determinar la composición de metabolitos, incluyendo azúcares: sacarosa, glucosa y fructosa; manitol, glicerol, etanol y los ácidos orgánicos: cítrico, succínico, láctico, acético, propiónico, entre otros. Las muestras se conservaron a una temperatura de -80°C .

4.4. Descripción del equipo

Las pruebas para evaluar el efecto de la radiación UV-C sobre las corrientes de proceso para control microbiano se realizaron en el “biorreactor” disponible en el laboratorio de microbiología industrial de CENICANÑA, el término “biorreactor” solo hace referencia al nombre del equipo empleado y no involucra procesos biológicos activos. Con el fin de adaptar las lámparas fue necesario realizar una impresión 3D que permitiera elevar la tapa del biorreactor, de manera que quedara el espacio suficiente para la salida del cable de la lámpara, ya que los orificios de la tapa no son lo suficientemente grandes para permitir el ingreso de esta. Adicionalmente, al quipo se le adaptó una cubierta de poliéster a la medida con el fin de evitar la exposición directa a la luz UV. El montaje de control se realizó utilizando el equipo de agitación orbital con control de temperatura Shaker de la marca Thermo Scientific, modelo MAXQ 4000, en un recipiente de vidrio de 4 L, al que se le adaptó una termocupla para monitorear la temperatura y un muestreador. A continuación, en las Figuras 4 y 5, se muestran la configuración del equipo y el montaje de control.

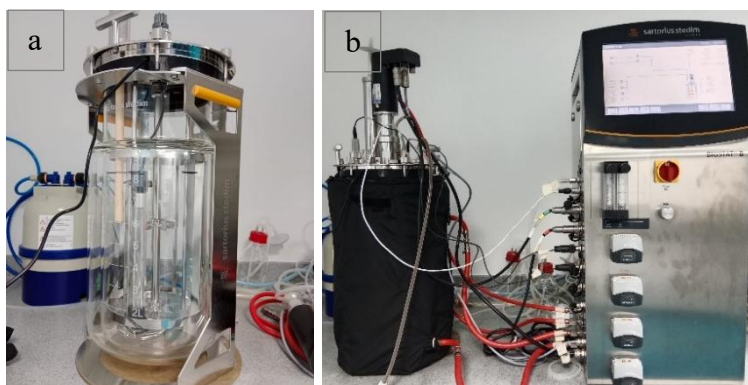


Figura 4. (a) Biorreactor adaptado con la lámpara UV. (b) Biorreactor adaptado con cubierta de seguridad. Fuente: Propia



Figura 5. Montaje de control. Fuente: Propia

La fuente de radiación es de tipo germicida, las lámparas son tubos de mercurio de baja presión, es decir que emiten fotones a una longitud de onda de 254 nm y se cuenta con tres potencias disponibles 5W, 7W y 11W. Las dimensiones de las lámparas son radio de 1,16 cm y el largo varía de acuerdo con la potencia, siendo la de mayor tamaño la de 11W con un largo de 26 cm. El equipo se adaptó con la lámpara UV, de modo que estuvo completamente sumergida en la matriz durante la aplicación del tratamiento, y se pudo modificar dependiendo de la potencia requerida. Previa la aplicación del tratamiento, se encendió la lámpara por un tiempo aproximado de 15 a 20 minutos para estabilizarla y evitar fluctuaciones en la potencia durante la experimentación.

4.5. Limpieza del equipo y materiales

Inicialmente el biorreactor se lavó con una solución de jabón extrán al 2,5 %. Dado que no es posible realizar una esterilización por autoclave y se requiere minimizar la contaminación de la muestra con otros microorganismos diferentes a los que ya se encuentran en la corriente de proceso, el biorreactor fue esterilizado de manera química empleando hipoclorito de sodio. Se preparó una solución al 3,5%, que es una concentración mayor a la establecida en las metodologías de esterilización, y se trató por un tiempo aproximado de 10 min. Los materiales restantes se esterilizaron siguiendo la misma metodología y solo las lámparas se trataron adicionalmente con etanol al 95% por un tiempo de 5 min.

4.6. Efecto de la potencia y tiempo de exposición sobre materiales de proceso

A continuación, en la tabla 1, se muestran las 6 pruebas de exposición realizadas para determinar el efecto de las variables potencia y tiempo de exposición sobre la actividad microbiana de las corrientes jugo filtrado, jugo claro y retornos dulces, durante la aplicación del tratamiento con radiación UV-C, se emplearon tres lámparas con potencias de 5W, 7W y 11W de manera aleatoria. Es importante mencionar que las muestras tienden a degradarse con el tiempo. Sin embargo, esta degradación se desacelera con la refrigeración.

Tabla 1. Pruebas de exposición a radiación UV-C.

Prueba	Potencias (W)	Tiempo de exposición (min)	Matriz
1	5, 7	30	Jugo filtrado
2	5, 11, 7	60	Jugo filtrado
3	11, 7, 5	60	Retornos dulces
4	5, 7, 11	120	Jugo claro
5	11	240	Jugo claro
6	11	210	Jugo claro

El tiempo de exposición se planteó con base en los estudios previos de la aplicación de esta alternativa sobre matrices similares, como lo son los jugos de frutas, en un rango aproximado de 5 a 30 min. Sin embargo, debido al tamaño de la muestra y el equipo empleados, fue necesario ampliar el tiempo de exposición para garantizar una buena aplicación del

tratamiento en toda la matriz. Para determinar el dosaje se tienen en cuenta las dimensiones del equipo y el tiempo de exposición.

4.7. Pruebas de aplicación de radiación UV-C

Para realizar las pruebas fue necesario llenar el reactor hasta un 85% de su capacidad, con el fin de que la lámpara estuviera totalmente sumergida en la matriz. La temperatura se monitoreó constantemente para mantenerla en el máximo tolerable por la lámpara UV (50 °C), la velocidad de agitación se mantuvo constante a 400 rpm y se midieron las variables brix, pH, conductividad, color, turbiedad y metabolitos microbianos: manitol, ácido láctico y azúcares reales vía HPLC, tanto para caracterizar la matriz como para las muestras extraídas a lo largo de la exposición con cada lámpara, esto con el propósito de calcular la eficiencia del tratamiento y monitorear el comportamiento de las variables.

Simultáneamente, se realizó el montaje de control con un recipiente de 4 litros, que se llenó hasta 2,5 L de su capacidad con la matriz a evaluar y se replicaron las condiciones a las que se encontraba la matriz en el biorreactor, esto con el fin de realizar la comparación de la degradación de la matriz con y sin el tratamiento. El muestreo se realizó en los tiempos establecidos, tanto en el biorreactor como en el montaje de control. La Figura 6 muestra el diagrama de flujo general del proceso de aplicación de radiación UV-C en las diferentes matrices y las principales recomendaciones en el montaje.

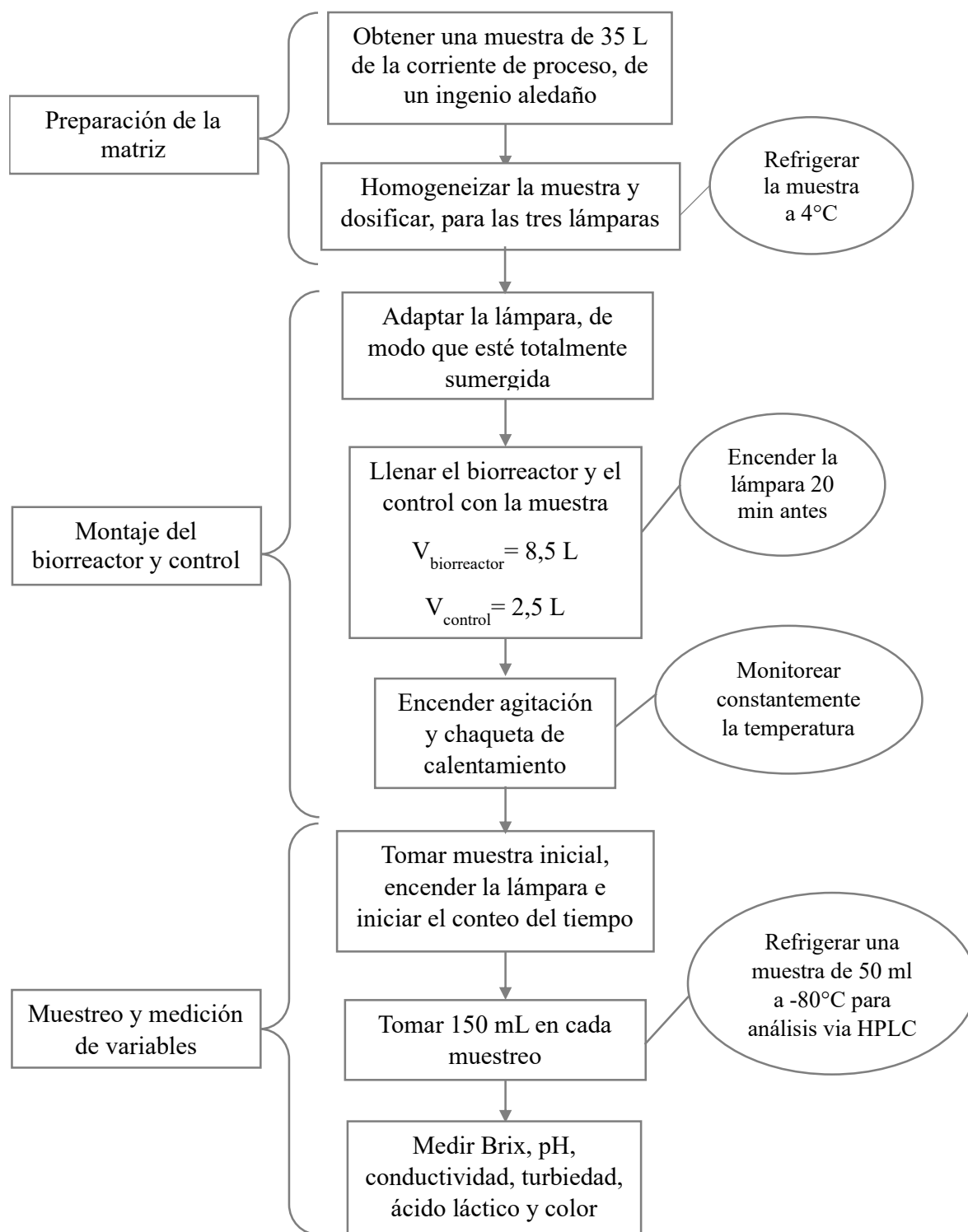


Figura 6. Diagrama de flujo del proceso de aplicación de luz UV-C sobre diferentes matrices.

Fuente. Propia.

4.8. Condiciones para mejorar la eficiencia sobre una matriz

Con el propósito de establecer las condiciones del tratamiento que permitieran mejorar la eficiencia sobre la corriente de proceso con mayor disminución de actividad microbiana, en un sistema estático de irradiación UV-C, se seleccionó la corriente que presentó mejores condiciones en cuanto a las variables que influyen directamente sobre la eficiencia del tratamiento, tales como: valores bajos de turbiedad, color y presencia de sólidos insolubles. Esta matriz se expuso a más tratamientos en los que se amplió el tiempo de exposición y se extrajeron las muestras para realizar el análisis sobre la abundancia y diversidad de microbiomas específicos por metagenómica.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Caracterización de las corrientes de proceso

Las Tablas 2, 3 y 4 presentan los valores de las variables fisicoquímicas medidas para caracterizar las matrices. Dado que la aplicación del tratamiento para cada lámpara debe realizarse en serie, aunque la matriz sea la misma, no se puede garantizar que durante el tiempo de refrigeración no se generen metabolitos que degraden la matriz, por lo cual, se midieron estas variables antes de cada tratamiento, tanto en el montaje para la aplicación del tratamiento como en el montaje de control.

5.1.1. Jugo filtrado

En el clarificador de jugo, el precipitado que se forma durante la clarificación se denomina lodos, estos se retiran del clarificador para recuperar la mayor cantidad de sacarosa posible por medio de un proceso de filtración en el que se adiciona bagacillo para dar consistencia y agua caliente (75 – 80°C) para facilitar la filtración. De este proceso se obtiene una parte sólida denominada cachaza y el jugo filtrado. El ingenio del que se obtuvo la corriente para las pruebas realiza la filtración con un sistema de filtros rotativos que, a diferencia de los filtros banda, presentan mayor contenido de sólidos suspendidos y contaminación microbiológica, en consecuencia, este jugo posee impurezas que favorecen la generación de compuestos coloreados, la inversión de la sacarosa y dificultan el proceso de clarificación (Cengicaña, 2021). La tabla 2 muestra los resultados de la caracterización fisicoquímica de la

corriente, evidenciando valores altos en la turbiedad (superiores a 18000 NTU) y un contenido de sacarosa menor a 8°brix. Esto se asocia con el tipo de filtro empleado en el ingenio y a la adición de agua requerida en este paso del proceso; el color de la matriz se encontró entre 5600 a 10000 UI, este es un rango aceptable dentro del proceso, sin embargo, pueden generarse compuestos orgánicos formadores de color que pueden influir en etapas posteriores a la recirculación. Por otro lado, el contenido de ácido láctico en base brix se encuentra en promedio entre 8000 y 22000 ppm, mientras que el manitol en base brix se encuentra entre los 2000 y 2200 ppm, esto indica mayor presencia de bacterias ácido-lácticas (BAL) que son macroorganismos grampositivos y una menor presencia de bacterias lácticas (BL) hetero fermentativas que son las productoras de manitol (Bleckwedel, 2018).

Tabla 2. Caracterización fisicoquímica del jugo filtrado.

Variables	5W-UVC	Control	7W-UVC	Control	11W-UVC	Control
Color (UI)	10837,5	10550	9624,9	10015,4	5736,8	5994,1
pH	6,45	6,46	5,55	5,55	5,48	5,54
°Brix	7,55	7,55	7,67	7,67	7,65	7,6
Turbiedad (NTU)	23925	23550	19500	18550	22658	24550
Ácido láctico / Brix	7880,8	8013,3	24380,7	23924,4	31503,3	22934,2
Manitol / Brix	2000	2066,2	2154	2180,2		

5.1.2. Retornos dulces

Esta corriente se encuentra conformada por los flujos de lavado de equipos y derrames dentro de la planta, además, en el proceso es común que se almacene en un tanque antes de ser recirculado, este tiempo de almacenamiento se da expuesto al ambiente por lo que se promueve la proliferación de microorganismos. La muestra de retornos dulces para estas pruebas se obtuvo de un ingenio que tiene un tanque enterrado en el que llegan todos los flujos de lavados de equipos y derrames, una vez alcanzado el nivel de llenado se retorna al proceso. Los tiempos de llenado de este tanque varían dependiendo de la operación de la planta por lo que no es posible determinar un tiempo promedio de residencia, esto genera una desventaja para el proceso ya que da lugar a la proliferación de microorganismos y la formación de compuestos formadores de color. En la tabla 3 se presentan los resultados de la caracterización de los retornos dulces, donde

se encuentran valores estables en el pH y el contenido de sacarosa, en promedio pH de 4.3 y 10° brix de sacarosa; el valor de pH es el más bajo en comparación con las otras matrices, esto sugiere una mayor acidez en la corriente. En cuanto a la turbiedad, se encontraron valores entre los 3700 y 4700 NTU estos son valores altos dentro del proceso y también pueden influir en la penetración de la radiación UV-C durante los ensayos. El contenido de color es superior a los 19000 UI, estos valores ya implican complicaciones dentro del proceso de producción ya que indican una carga alta de compuestos formadores de color que retornarán al proceso, lo que puede implicar un aumento en el consumo de insumos para corregir este parámetro antes de que se manifieste en el producto terminado. Con respecto a la carga microbiológica presente en la corriente, los valores en ácido láctico en base brix se encontraron entre 23200 y 24700 ppm, mientras que el manitol en base brix se encontró entre 1000 y 1700 ppm; esto indica un contenido de bacterias ácido-lácticas (BAL) similar a la corriente de jugo filtrado, mientras que hay una menor presencia de bacterias lácticas (BL) generadoras de manitol con respecto al jugo filtrado.

Tabla 3. Caracterización fisicoquímica de los retornos dulces.

Variables	5W-UVC	Control	7W-UVC	Control	11W-UVC	Control
Color (UI)	21725,4	23844,5	23727	24848	19073,1	24985,5
pH	4,32	5,26	4,331	4,3	4,33	4,33
°Brix	10,38	10,13	10,42	9,61	10,33	10,33
Turbiedad (NTU)	4335	3795	4745	4040	4760	4210
Ácido láctico / Brix	24376	24192	23243	24472	23224	24792
Manitol / Brix	1213,9	1076	1314,8	1144,6	1723	1084,2

5.1.3. Jugo claro

El jugo extraído por la parte superior del clarificador se conoce como jugo claro y se espera que sea una corriente libre de materiales en suspensión ya que ha pasado por todo el proceso de clarificación además de un proceso de calentamiento que reduce la proliferación de microorganismos. Como se muestra en la tabla 4, el jugo claro tuvo valores de ácido láctico en base brix, entre 1100 a 2000 ppm y los valores de manitol en base brix se encontraron entre 690 a 860 ppm que son concentraciones menores con respecto a las anteriores matrices. Además, los valores de turbidez fueron de 200 a 300 NTU lo que puede significar una menor interferencia

en la penetración de la radiación UV-C. Con respecto al contenido de azúcares, en la evaluación de la potencia de 5W fue de 18°brix, mientras que en las evaluaciones de las lámparas de potencia 7 y 11W se encontró en 12.5°brix, la diferencia se debe a que estas evaluaciones se realizaron en días diferentes y las condiciones en proceso cambiaron. Esto también influyó en el color ya que en la evaluación con 5W se encontró menor a 16900 UI, mientras que en las evaluaciones de 7 y 11W se incrementaron a un orden de 19000 UI. Los valores de pH se mantuvieron estables en un rango de 6,7 a 6,9 en todas las evaluaciones.

Tabla 4. Caracterización fisicoquímica del jugo claro.

Variable	5W-UVC	Control	7W-UVC	Control	11W-UVC	Control
Color (UI)	15599	16926,6	19887,5	19519,1	19616,9	19795,3
pH	6,94	6,9	6,79	6,85	6,74	6,84
°Brix	18,21	18,12	12,85	12,75	12,98	12,87
Turbiedad (NTU)	215	232	276	267	351	282
Ácido láctico / Brix	2048,3	1810,2	1208,1	1109,3	1191,7	1186,5
Manitol / Brix	818,2	827,8	856	745,1	862,9	691,5

En la tabla 5 se resume la caracterización de las tres matrices evaluadas, donde se puede evidenciar de manera más clara la diferencia en los valores de las variables para cada matriz. La menor contaminación microbiológica la presenta el jugo claro.

Tabla 5. Caracterización fisicoquímica promedio de las matrices.

Variable	Jugo filtrado (promedio)	Retornos dulces (promedio)	Jugo claro (promedio)
Color (UI)	8306,7	21199,2	17990,7
pH	6,13	4,33	6,81
°Brix	7,61	10,38	15,24
Turbiedad (NTU)	22122,1	4540,8	267,5
Ácido láctico / Brix	19692,1	23842	1627,6
Manitol / Brix	2000	1468,5	840,6

5.2.Cálculo del dosaje y determinación del tiempo de exposición

Realizando la búsqueda bibliográfica se encontraron estudios con los valores de dosajes aplicados a diferentes tipos de microorganismos y se lograron establecer los valores mínimos y máximos necesarios para su inactivación, siendo los virus y las algas los que requieren dosis más alta, como se muestra en la Tabla 6.. Teniendo en cuenta lo anterior, se realizó el cálculo del dosaje con las tres potencias de las lámparas disponibles a diferentes tiempos de exposición, presentados en la Tabla 7. Estos presentaron valores superiores a los requeridos, sin embargo, este es el dosaje suministrado por la lámpara y es diferente al dosaje absorbido por los microorganismos, ya que depende de variables propias de la matriz y del tipo de microorganismos presentes.

Tabla 6. Dosaje requerido para inactivación de diferentes microorganismos. Tomado de: Correa, et al., 2020.

Microorganismo	Dosis (mJ/cm²)	
	Min	Max
Esporas	<6	370
Bacterias	1,5	39
Protozoarios	<1	132
Virus	5	246
Algas	>60	720

Tabla 7. Dosaje aplicado por cada lámpara en relación con el tiempo de exposición.

Tiempo (min)	Dosaje (mJ/cm²)		
	5W	7W	11W
60	5337,3	7472,2	11742
120	10674,6	14944,4	23484,1
240	21349,1	29888,8	46968,1

5.3.Principales factores influyentes en la eficiencia de la tecnología UV

La eficiencia de la tecnología UV se encuentra afectada por tres factores principales: Tiempo, intensidad y penetración.

Tiempo: La eficacia del tratamiento aumenta cuando el tiempo de exposición es mayor.

Intensidad: la potencia de la lámpara influye sobre la intensidad del rayo de luz que llega a un objeto, además del tipo y cantidad de partículas que puedan interferir en el recorrido de los rayos. La intensidad es directamente proporcional a la potencia e inversamente proporcional a la distancia.

Penetración: La constitución del material irradiado influye sobre la eficacia del tratamiento, la penetración del rayo de luz ultravioleta se reduce por la turbidez y sales disueltas, incluso puede ser interceptado por una capa débil de sustancias grasas o agua pura. De esta manera, los rayos ultravioletas no penetran en los microorganismos presentes en el interior, sólo afectan la superficie externa de los alimentos irradiados.

Para el caso de los alimentos líquidos, la penetración depende de la densidad óptica, el color, viscosidad, turbidez, pH y composición química. Una atenuación alta de la intensidad de la luz que pasa a través del material genera una disminución en la capacidad de penetración en los alimentos y reduce significativamente la eficacia del tratamiento a cualquier dosis de UV-C. La cantidad de fotones disponibles para inactivar microorganismos puede verse reducido por componentes como el color, compuestos solubles y sólidos en suspensión que los absorben, reflejan y dispersan la luz incidental proporcionando un sitio para la agregación de bacterias.

La dosis de UV está asociada con la magnitud del daño en el ADN y la capacidad de reparación de los microorganismos. En este aspecto, cabe resaltar que la dosis, es decir, cantidad de energía o fotones administrados sobre un objeto o alimento no implica que sea totalmente absorbido por el material. La dosis absorbida hace referencia a la cantidad de energía o fotones disponibles y que se administran a los microorganismos.

5.4.Uso de la radiación UV-C sobre corrientes de proceso

De acuerdo con la información encontrada en los antecedentes, la aplicación del tratamiento sobre los alimentos líquidos no afecta las propiedades físicas, químicas y nutricionales. Algunos estudios de tratamiento con UV sobre diferentes jugos no han mostrado un cambio significativo sobre el pH, °Brix, color y turbiedad. Un estudio con jugo de manzana mezclado con jugo de arándanos a diferentes concentraciones evaluó el efecto de diferentes dosis de radiación UVC sobre las propiedades fisicoquímicas y microbiológicas (Cárdenas,

2020). Se determinó que no hubo cambios en el pH, flavonoides totales, antocianinas totales, azúcares reductores, sólidos solubles totales y contenidos de actividad antioxidante; mientras que la carga microbiana nativa fue eliminada completamente y con la misma eficacia que el tratamiento térmico a dosis $>4,85 \text{ mJ/cm}^2$, exceptuando hongos y levaduras.

Para evaluar el efecto sobre las características fisicoquímicas y microbiológicas del néctar de pitahaya amarilla aplicando la radiación UV-C y pasteurización, Cardozo & Ruiz (2019) sometieron el néctar de la fruta durante 14 días, concluyendo que el pH, % de acidez y sólidos solubles durante los días evaluados no se vieron afectados por ninguno de los dos tratamientos, sin embargo, ambos tratamientos afectaron significativamente la concentración de fenoles. No obstante, se encuentran dentro de los parámetros establecidos en la NTP 203:110.2009.

5.5.Efecto de la luz UV-C sobre jugo filtrado

Se realizaron dos ensayos en los se evaluaron las potencias 5W-7W y 5W-11W-7W, respectivamente, se observaron tendencias variables según los parámetros analizados. En cuanto al pH, se registró una disminución general en todas las muestras con el paso del tiempo, siendo más pronunciada en las muestras expuestas a la lámpara de 5W y su control. Esta diferencia con respecto a los tratamientos con las lámparas de 7W y 11W se atribuye a la degradación generada durante el almacenamiento, dado que no fue posible lograr una refrigeración inmediata que detenga por completo la formación de ácidos. Esto se debe a que jugo filtrado se encontraba a una temperatura superior a 60°C en el ingenio. Por otro lado, la medición de Brix mostró un comportamiento relativamente estable, lo que indica que el tratamiento no afecta el contenido de sólidos solubles en el jugo. En la figura 7, los gráficos (a) y (b) muestran el comportamiento descrito por el pH y brix, respectivamente.

A continuación, en la figura 7 se muestran los gráficos que describen el comportamiento de las variables color, pH, ácido láctico y brix. En cuanto al análisis de color, se observó estabilidad en los tres tratamientos y sus respectivos controles. Sin embargo, se encontraron diferencias en los valores, con un rango de 4000 a 6000 UI para la potencia de 11W y de 9500 a 11500 UI para las potencias 5W y 7W, lo que podría ser ocasionado por la degradación de las muestras, un

comportamiento similar al observado en el pH. A pesar de las fluctuaciones en todas las muestras, el tratamiento con la lámpara de 5W y su control arrojó una tendencia al aumento de color, mientras que los tratamientos con las lámparas de 7W y 11W presentaron variaciones más pronunciadas, este comportamiento se presenta en la figura 7.d). En general, los resultados sugieren que el tratamiento tiene pocos efectos sobre variables como el color y el brix del jugo; no obstante, las variaciones en los niveles de ácido láctico y pH sugieren posibles cambios en la actividad microbiana de las muestras.

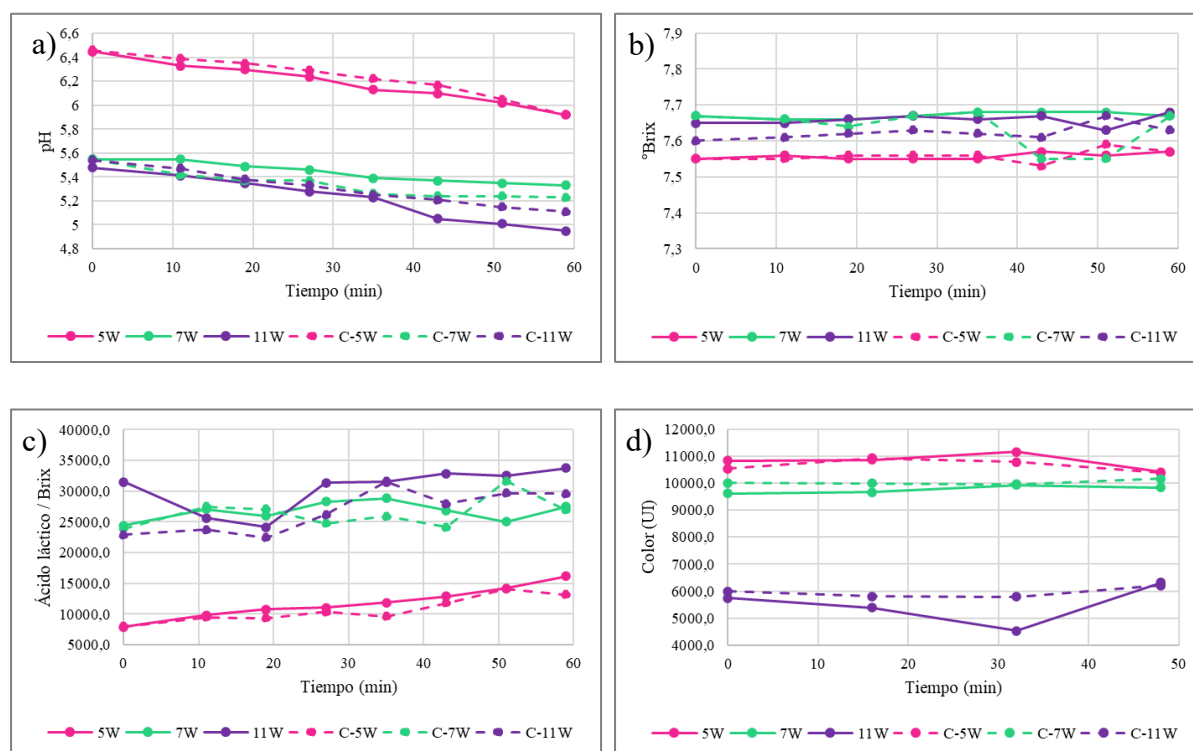


Figura 7. Gráficos de resultados de las variables (a) pH, (b) Brix, (c) Ácido láctico y (d) color. Fuente. Propia.

Por otro lado, de los análisis realizados por el laboratorio de cromatografía se obtuvieron resultados completos de azúcares, y manitol solo en los tratamientos con las lámparas de 5W y 7W. En la figura 8, el gráfico (a) muestra la variación en la concentración de sacarosa durante el tratamiento, indicando una degradación a lo largo del tiempo en todas las muestras, independientemente de la potencia empleada. No existen diferencias notables entre las muestras tratadas y los controles indicando que el tratamiento con radiación UV-C no tiene efecto significativo en la degradación de la sacarosa a estas condiciones. El gráfico (b) muestra el

comportamiento de la fructosa durante el tratamiento evidenciando un comportamiento similar al de la sacarosa, aunque con mayor variabilidad durante los primeros 20 min de las muestras con tratamiento, las muestras controles se mantuvieron más estables y al final del experimento todas las muestras tienden a converger a un rango de 0,1 a 0,3%p/p. Finalmente, en la figura (c) se observa un comportamiento similar en los azúcares totales de todas las muestras y su convergencia se encuentra en un rango de 6 a 8%p/p finalizando el tratamiento.

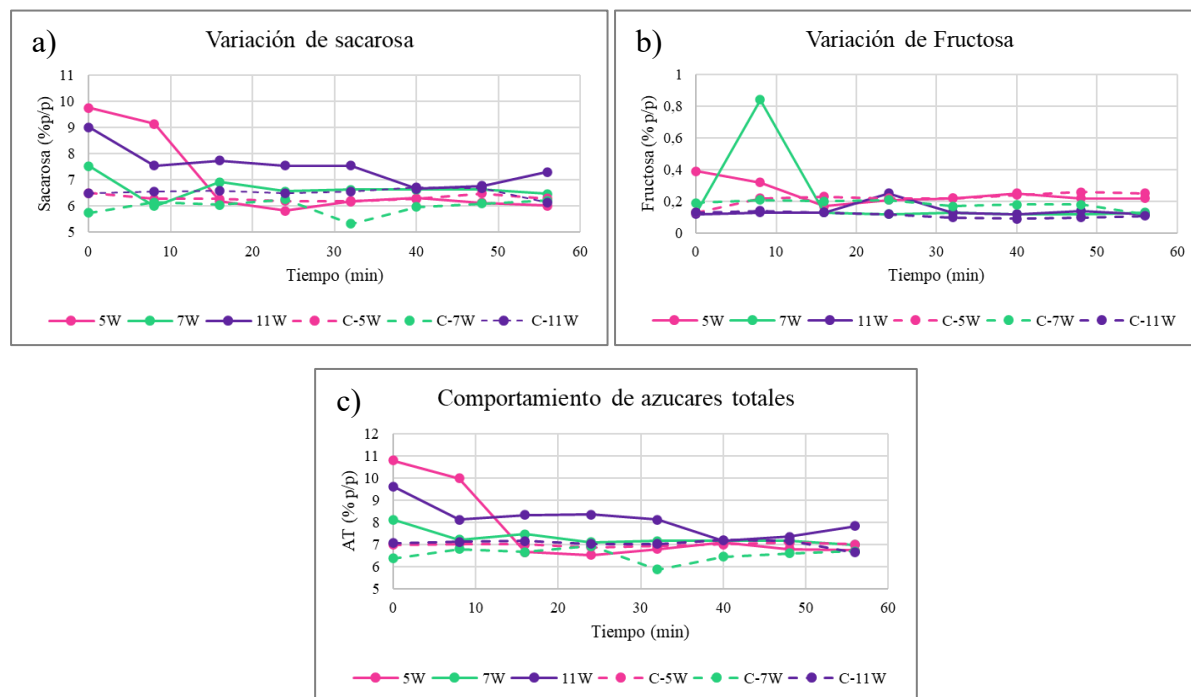


Figura 8. Variaciones en azúcares y metabolitos medidos (a) sacarosa, (b) fructosa y (c) azúcares totales. Fuente. Propia.

5.6.Efecto de la luz UV-C sobre retornos dulces

Se realizó un ensayo sobre retornos dulces con un tratamiento de 1 hora utilizando potencias de 11W, 7W y 5W, en ese orden, se observó un comportamiento similar al de jugo filtrado en cuanto a las variables como pH, Brix y turbiedad. En la figura 9, las mediciones de ácido láctico, tanto por el kit (a) y como por vía HPLC (e), muestran variaciones similares en todas las muestras, aunque los resultados obtenidos por HPLC presentan una mayor estabilidad. Sin embargo, no se evidencia una convergencia clara ni una tendencia positiva o negativa en los datos.

La grafica de color (b) refleja una variación general en todas las muestras, aunque con mayor estabilidad sobre las muestras de control. Se detectaron fluctuaciones en todas las muestras dentro del rango de 1000 a 1500 ácido láctico/Bx, excepto en el tratamiento con la potencia de 11W, cuyos valores superaron los 1600 ácido láctico/Bx, hasta los 40 minutos, cuando finalmente convergieron con los valores de los tratamientos con potencias de 5W y 7W. El cuanto al ácido acético, representado en el grafico (d), no evidenció una tendencia uniforme para ninguno de los tratamientos, con fluctuaciones en un rango de valores de 8000 a 13000 ácido acético/Bx.

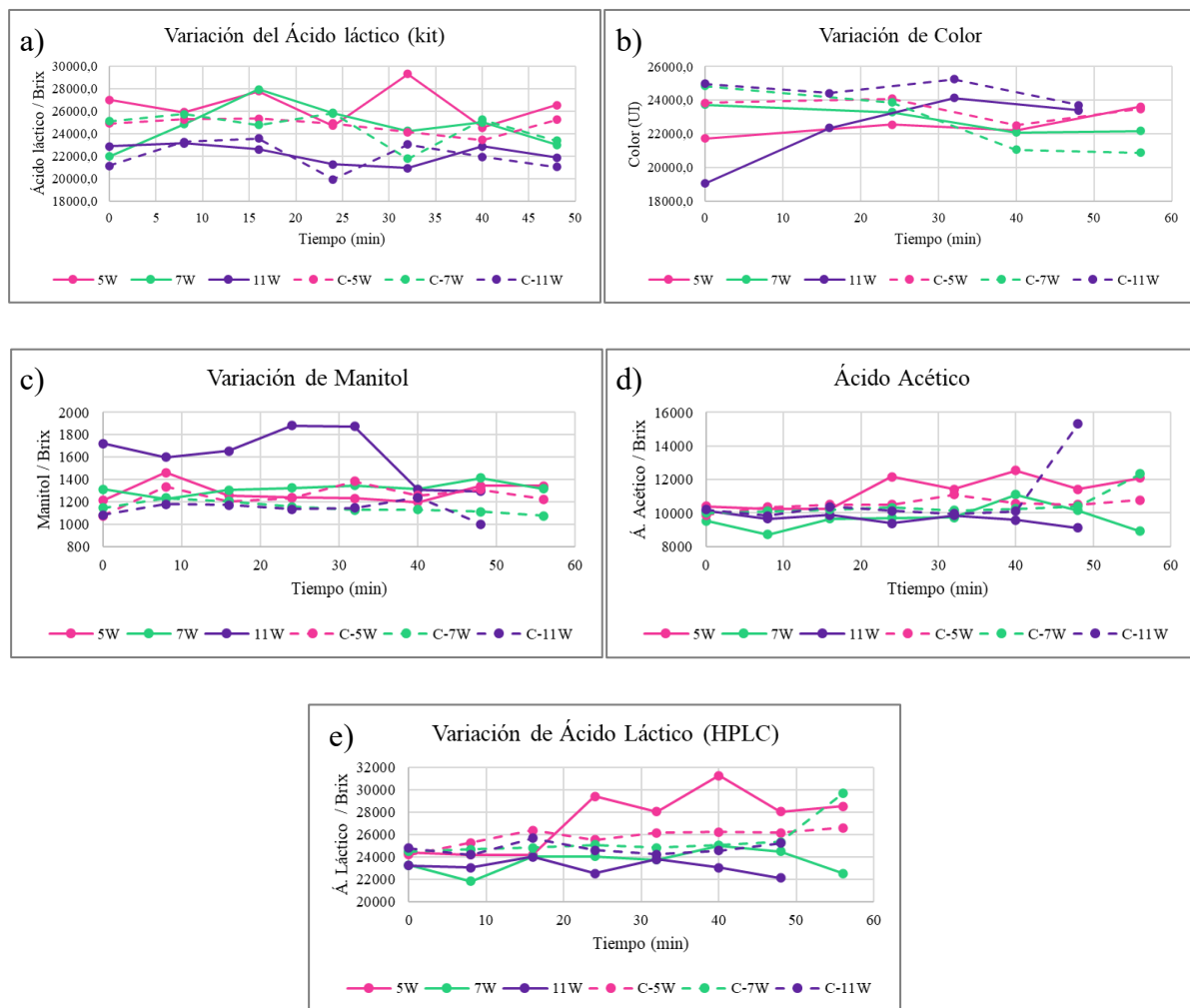


Figura 9. Variaciones en los parámetros medidos durante el tratamiento (a) ácido láctico (kit), (b) color, (c) manitol, (d) ácido acético y (e) ácido láctico (HPLC). Fuente. Propia.

Las variaciones en los parámetros analizados durante la aplicación del tratamiento con radiación UV-C no muestran una tendencia lineal ni uniforme, esto sugiere realizar cambios en las condiciones de aplicación de los tratamientos, principalmente sobre los factores como la turbiedad, color y cantidad de sólidos suspendidos que tienen mayor influencia sobre la incidencia del rayo de luz. Las matrices hasta ahora evaluadas presentaron valores altos en la turbiedad, desde los 3000 a 5400 NTU para retornos dulces y desde 12000 a 24500 NTU para jugo filtrado, y valores de color desde 19000 a 25000 UI en retornos dulces y 4500 a 11000 UI en jugo filtrado. Adicionalmente, durante la homogeneización de las matrices se notó la presencia de bagacillo.

5.7.Efecto de la luz UV-C sobre jugo claro

En la caracterización del jugo claro se encontraron rangos de 200 a 440 NTU para la turbiedad y de 14700 a 20000 UI, para el color. Las potencias de 5W, 7W y 11W se evaluaron en ese orden durante un periodo de 2 horas, con muestreo cada 15 minutos. En la figura 10 se muestra el comportamiento de los parámetros evaluados durante el tratamiento. En el gráfico de color (a) se evidencia una estabilidad en todos los tratamientos, con mínimas variaciones entre las muestras tratadas y sus controles. El tratamiento con la potencia de 5W fue el más variable con respecto a su control, aunque conserva una tendencia general a la estabilidad, lo que confirma que el tratamiento con radiación UV-C no afecta significativamente el color de las matrices.

En los gráficos de ácido láctico evaluados con el Kit (b) y por HPLC (d), se evidencia una mayor variación en el tratamiento con la lámpara de 5W, mientras que los tratamientos con 7W y 11W muestran un comportamiento más estable. No obstante, ninguno de los tratamientos indica una tendencia clara, ya sea positiva o negativa, sobre los niveles de ácido láctico. Además, se evidencian diferencias significativas entre los valores de medidos por ambos métodos: el kit reporta concentraciones de ácido láctico entre 200 a 450 ácido láctico/Bx mientras que por vía HPLC registró valores entre los 900 a 2100 ácido láctico/Bx. El gráfico de manitol (c) muestra variaciones en los tratamientos de 5W y 7W, mientras que el tratamiento con 11W presenta mayor estabilidad a lo largo del tiempo, con una tendencia descendente, lo que sugiere una disminución en el manitol. Los controles también mostraron mayor estabilidad durante el

tratamiento. Finalmente, en el gráfico de ácido acético (e) no se evidencia una tendencia clara de aumento o disminución en ninguno de los tratamientos.

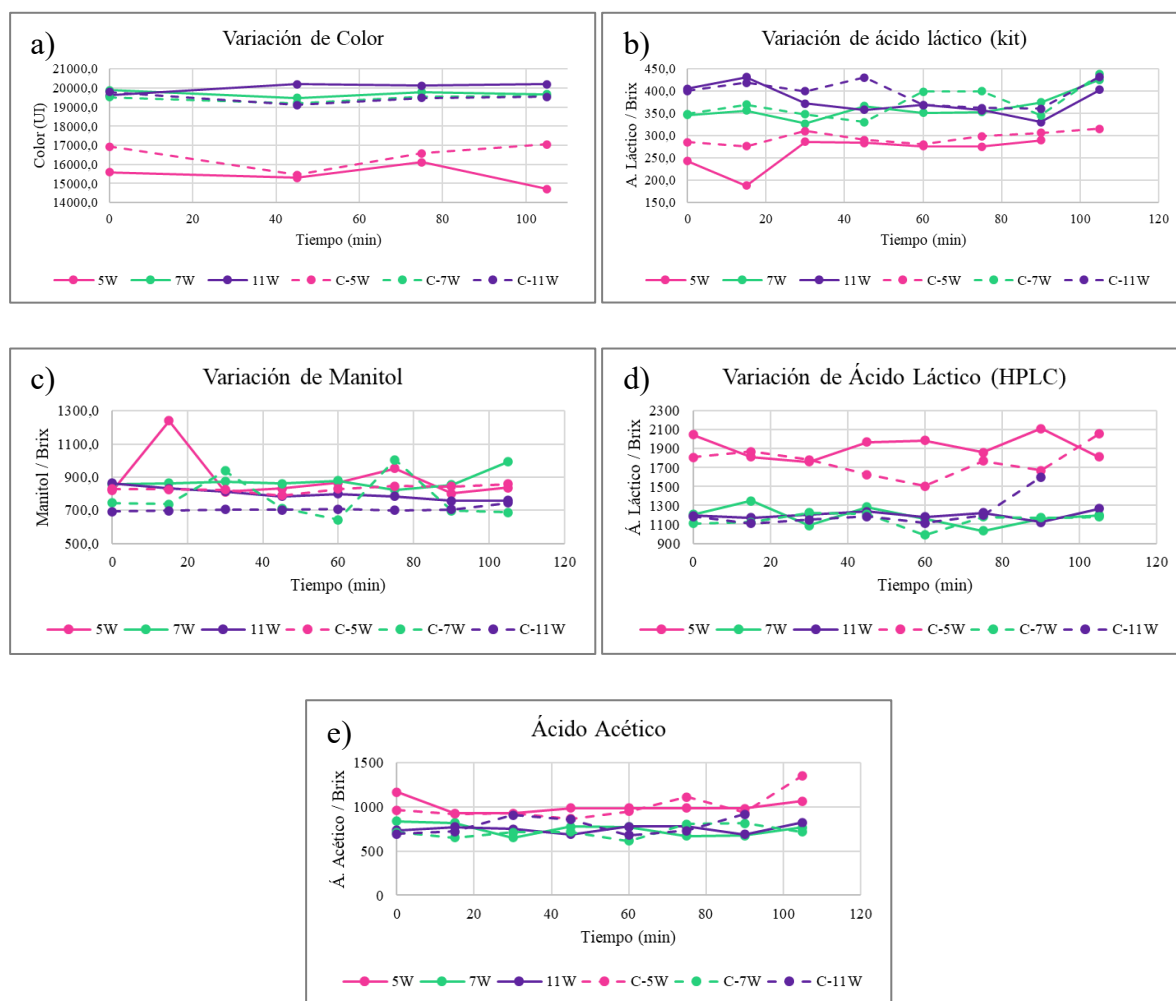


Figura 10. Variaciones en los parámetros medidos durante el tratamiento (a) color; (b) ácido láctico (kit), (c) manitol, (d) ácido láctico (HPLC) y (e) ácido acético. Fuente. Propia.

En general, los resultados de las aplicaciones no presentaron una tendencia clara en ninguna de las matrices evaluadas que permita cuantificar el efecto de la radiación UV-C, aunque este método ha demostrado ser efectivo en otros estudios sobre inactivación microbiana y se ha evidenciado que no influye sobre variables como el pH, color, sólidos solubles y turbidez (Kijpatanasilp, et al, 2023). A continuación, se detallan algunos factores influyentes en las evaluaciones que pueden haber afectado los resultados.

Montaje y exposición: El montaje empleado consistió en un reactor estático con capacidad de 10 L y un porcentaje de llenado de 80%, la lámpara se ubicó en un extremo del reactor lo cual generó una distribución desigual de la radiación sobre la muestra. El estudio realizado por J. W. de Sousa & G. L. de Sousa et al., en 2021, logró resultados positivos aplicando radiación UV-C sobre jugo de caña, sin embargo, las condiciones de tratamiento fueron diferentes. La matriz se obtuvo de manera comercial para posteriormente ser filtrada y almacenada en recipientes de vidrio esterilizados, el tamaño de la muestra fue de 50 mL y se emplearon tres lámparas de potencia 125, 250 y 375 W con tiempos de exposición de 1, 3 y 5 minutos, además, el análisis microbiológico se realizó mediante recuento en placa. Así mismo, una evaluación realizada sobre jugo de melón Cantaloupe (Fundo, 2019) que tuvo como objetivo extender la conservación del jugo en refrigeración, empleó una muestra de 25 mL de jugo vertidos en placas Petri con agitación magnética a una distancia de 30 cm de la lámpara UV de 15W; el tratamiento se aplicó durante 5 a 20 min en muestras de jugo no contaminado, dos muestras inoculadas con dos tipos de esporas y finalmente el análisis microbiológico también fue realizado por recuento en placa. Todas estas condiciones favorecen la aplicación del tratamiento ya que se reducen al máximo los factores que puedan impedir que el rayo de luz impacte homogéneamente sobre la matriz. Ambos estudios encontraron las condiciones de tratamiento con radiación UV-C que lograron reducir las colonias de bacterias y esporas, además, encontraron que en general el cambio en el pH, °brix, turbiedad y color no sufrieron cambios significativos con el tratamiento.

Adicionalmente, muestras de mayor tamaño y tiempos de exposición más amplios se han evaluado en sistemas de aplicación de radiación UV-C de flujo continuo, como es el caso del estudio de Vybhav et al, en 2018, que empleó una bebida saborizada de arándano inoculada con *Escherichia Coli* y *Salmonella* entérica en un sistema de aplicación continuo que consistía de un haz de tubos de teflón dispuestos alrededor de la lámpara UV-C, el líquido ingresaba por la parte inferior del sistema con ayuda de una bomba. Los rangos de radiación UV fueron de 6 y 21 mJ/cm² con tiempos de exposición de 115 y 403 segundos para *E. Coli* y para *Salmonella* de 94 a 376 s con rango de radiación de 5 a 20 mJ/cm², obteniendo reducciones de hasta 5 unidades logarítmicas de inactivación de ambos microorganismos en las dosis más altas y encontraron reducciones en las concentraciones de ácido ascórbico y antocianinas del agua saborizada de arándano, no se generaron compuestos citotóxicos ni degradó sus compuestos bioactivos.

5.8. Análisis microbiológico

Con el fin de realizar el análisis de población microbiana se extrajo el ADN de 4 muestras de jugo claro, que fue evaluado por un periodo de 210 minutos con 11W de potencia, siguiendo la metodología planteada en el kit QIAGEN de purificación de ADN y ARN. Una vez realizada la extracción de ADN se empleó la electroforesis en gel de agarosa para separar las moléculas en función del tamaño y carga eléctrica. En la figura 11 se muestra el resultado de la electroforesis aplicada a las 4 muestras de jugo claro, donde B representa el estándar de referencia, contiene fragmentos de ADN de longitudes conocidas; en el pozo 1 se encuentra la muestra inicial sin tratamiento, en el pozo 2 se encuentra la muestra extraída después de 2 horas de exposición a UV-C, el pozo 3 contiene la muestra final a 3 horas y 30 min de exposición y el pozo 4 contiene la muestra final de control después de 3 horas y 30 min sin exposición a la luz UV-C.

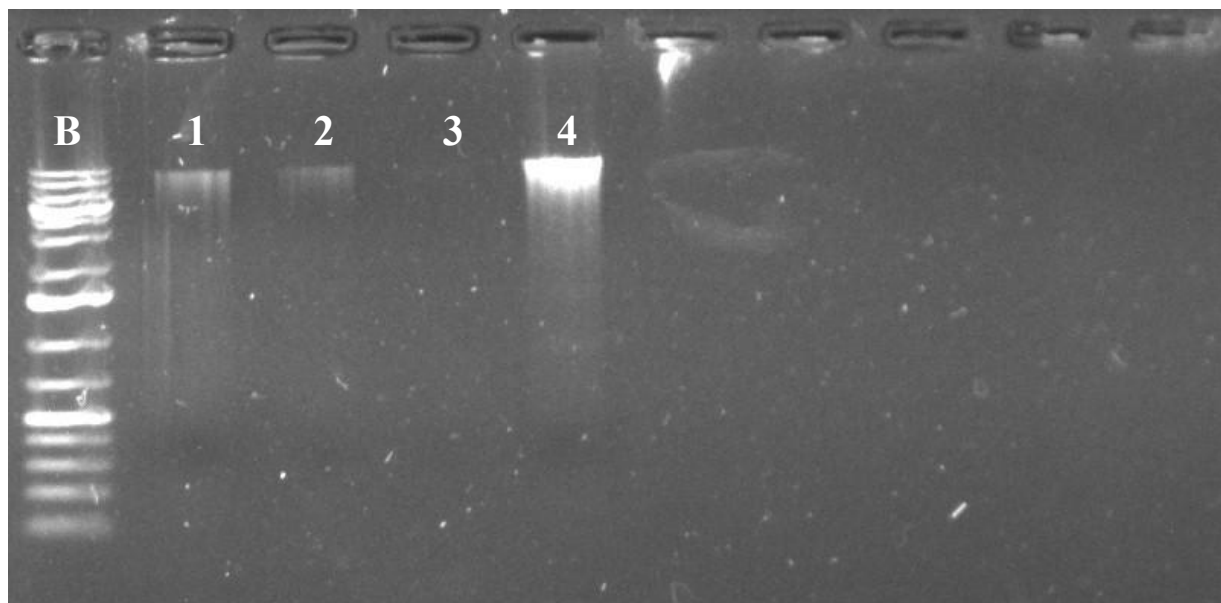


Figura 11. Resultado de la electroforesis en gel de agarosa de las muestras extraídas. Fuente. Propia.

La electroforesis mostró el contenido de ADN en las 4 muestras a evaluar, siendo evidente un mayor contenido de ADN en la muestra 4, es decir, la muestra de control que no fue tratada, mientras que las muestras 2 y 3 que fueron expuestas a la luz UV-C evidencian una

disminución en el contenido de ADN, siendo poco visible en la muestra 3, lo cual sugiere que el ADN fue dañado por la radiación UV-C. Lo anterior indica que la aplicación del tratamiento con la potencia de 11W fue efectivo sobre la población microbiológica presente en jugo claro, a pesar de que no fue evidente en los demás parámetros analizados anteriormente. Una posible causa de esto puede ser que los métodos no sean tan sensibles para evidenciar los cambios generados a nivel microbiológico ya que el volumen de la muestra de jugo expuesta a la radiación UV-C fue de 8L y a pesar de que se mantuvo agitación constante durante toda la prueba y durante cada muestreo, estas muestras se tomaron en tubos falcon de 50 mL lo cual puede no ser representativo de todo el contenido evaluado. Además de esa muestra de 50 mL se tuvo que extraer incluso solo 1 mL para realizar la dilución ya que los equipos no cuentan con rangos tan amplios de lectura, como el caso del turbidímetro portátil que lee de 0 a 1000 NTU, y el kit de ácido láctico que lee en un rango de 3 a 60 ppm. Para medir el ácido láctico en jugo claro la medición fue directa en la mayoría de las mediciones, sin embargo, también fue necesario realizar diluciones de 1/15 y 1/30; en jugo filtrado y retornos dulces se realizaron diluciones de 1/25 hasta 1/60. Asimismo, la metodología de medición de color Icumsa, también requiere diluciones y ajustes adicionales que amplían aún más la incertidumbre en las mediciones. Por otra parte, los muestreos en el control sin tratamiento si tuvieron que ser realizados pausando la agitación debido al montaje empleado; es por eso que las variables que no se ven afectadas por la radiación UV-C como la turbidez y el color mostraron resultados diferentes a pesar de tratarse de la misma muestra.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- El tratamiento con radiación UV-C mostró variaciones generales en todas las potencias y matrices evaluadas, aunque con menor impacto sobre variables como el color, turbiedad y Brix. Los azúcares y ácidos orgánicos indican una mayor variación debido a la aplicación del tratamiento, sin embargo, no muestran una tendencia positiva o negativa.
- Las fluctuaciones fueron más evidentes con la potencia de 5W, mientras que la potencia de 11W fue la que se mantuvo más estable en la mayoría de los parámetros evaluados. Las muestras de control, por lo general, tuvieron un comportamiento más estable y no hubo picos en las gráficas como los presentados con la exposición a UV-C.

- A nivel microbiológico si se observó la efectividad de la radiación UV-C sobre jugo claro, ya que por medio de la electroforesis se detectaron los daños causados al ADN de los microorganismos presentes durante las horas de tratamiento.
- Factores como las bajas potencias de las lámparas empleadas, los altos volúmenes trabajados y la sensibilidad de las metodologías empleadas para medir las diferentes variables que se tuvieron en cuenta como los indicadores de deterioro, pueden ser la causa de que no se reflejen los cambios ocurridos a nivel microbiológico durante la exposición a la radiación UV-C.
- Se recomienda evaluar esta alternativa reduciendo el volumen de trabajo para asegurar una mejor área de exposición a la radiación y disminuir los obstáculos que impiden que el rayo de luz impacte sobre toda la muestra. Además, se recomienda realizar análisis metagenómicos y conteos en placa de microorganismos aislados, con el objetivo de profundizar en la caracterización del contenido microbiológico presente en las matrices, y así identificar el crecimiento o inhibición de las diferentes poblaciones microbianas.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Adrian Torrebiarte. (2023) Dos temporadas consecutivas de La Niña disparan los precios del azúcar en Colombia Czapp. <https://www.czapp.com/es/analyst-insights/dos-temporadas-consecutivas-de-la-nina-disparan-los-precios-del-azucar-en-colombia/>
- Asocaña. (2022). *Sector Agroindustrial de la Caña en Colombia*. Sector Agroindustrial de la Caña, de: <https://www.asocana.org/publico/info.aspx?Cid=215>
- Bleckwedel, J. (2018). Aspectos moleculares de producción de manitol por bacterias lácticas heterofementativas.
- Camacho, M., & Celany, A. (2021). *Análisis de la microbiota alterante presente en la superficie de los tanques recibidores y en los jugos de caña*.
- Cardozo Cubas, J. L., & Ruiz Torres, D. (2019). Evaluación físico-química y microbiológica del néctar pitahaya amarilla (*Hylocereus triangularis*), sometido a tratamientos por radiación con luz ultravioleta UV-C y pasteurización.
- Chumioque García, A. P., & Flores Vidaurre, K. E. (2016). *Determinación de la dosis óptima del biocida a base de extracto de lúpulo beta stab 10a para controlar la pérdida de azúcar por inversión de sacarosa en el jugo de caña*. Repositorio institucional Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.
- Correa, M., Mera, S., Guacho, F., Villarreal, E., & Valencia, S. (2020). *Desinfección mediante el uso de luz UV-C germicida en diferentes medios como estrategia preventiva ante la COVID-19*. Revista Minerva: Multidisciplinaria de Investigación Científica, 1(2), 46-53.
- Daniela Alzate Rojas. (2021). *La Caña de Azúcar, una agroindustria que impulsa el progreso*. Noticias de Cali, Valle Y Colombia - Periodico: Diario El País; El País.

<https://www.elpais.com.co/contenido/la-cana-de-azucar-una-agroindustria-que-impulsa-al-valle-del-cauca.html>

De Sousa Filho, J. W., & de Sousa, G. L. Pedro Henrique do Nascimento Pereira et al. (2021).

“*Ultraviolet irradiation as an alternative to purify the sugarcane juice for sugar and ethanol production*”, International Journal of Development Research, 11(06), 48219-48225.

Fundo, J. F., Miller, F. A., Mandro, G. F., Tremarin, A., Brandão, T. R., & Silva, C. L. (2019).

UV-C light processing of Cantaloupe melon juice: Evaluation of the impact on microbiological, and some quality characteristics, during refrigerated storage. LWT, 103, 247-252.

Kijpatanasilp, I., Narumonlittikrai, P., Sheikh, K. A., Jafari, S., Worobo, R. W., & Assatarakul,

K. (2023). *Microbial inhibition and shelf-life extension of longan (Dimocarpus longan) juice by UV radiation. Food Control, 149, 109694.*

Koutchma, T. (2009). *Advances in ultraviolet light technology for non-thermal processing of*

liquid foods. Food and Bioprocess Technology, 2, 138-155.

<https://doi.org/10.1007/s11947-008-0178-3>

Martínez, F. M. (2023). *Sinergismo de la pasteurización UV-C, extracto de E. polystachya y*

nanopartículas de aceite esencial de menta en el procesamiento de jugo de mandarina.

Universidad Nacional Autónoma de México.

Salgado, S., Núñez, R., J Peña, J., Etchevers, J. D., Palma, D. J., & Soto, R. M. (2003). *Manejo*

de la fertilización en el rendimiento, calidad del jugo y actividad de invertasas en caña de azúcar. Interciencia, 28(10), 576-580.

Toto Guillén, F. A. (2021). *Valoración de fungicidas en la reducción de pérdida de sacarosa en jugo de caña de azúcar durante el proceso de extracción*. Tecnológico Nacional de Mexico, 7-9.

Valdez Cárdenas, M.D.C. (2020) Efecto de la radiación UV-C con tratamientos térmicos moderados sobre parámetros de calidad en mezclas de jugo de manzana (*Pyrus malus* L.) con arándano azul (*Vaccinium corymbosum*) (Doctoral dissertation Universidad Autónoma de Chihuahua).

Vybhav Vipul Sudhir Gopisetty, Ankit Patras, Agnes Kilonzo-Nthenge, Sudheer Yannam, Rishipal R. Bansode, Micheal Sasges, S. Mallory Burns, Matthew J. Vergne, Che Pan, Hang Xiao (2018). *Impact of UV-C irradiation on the quality, safety, and cytotoxicity of cranberry-flavored water using a novel continuous flow UV system*, LWT, Volume 95, Pages 230-239, ISSN 0023-6438, <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.04.042>.

ANEXOS

Anexo 1. Tabla de datos de la aplicación del tratamiento en jugo filtrado.

Potencia	ID	Tiempo (min)	T (°C)		pH		C (Ms/cm)		°Brix		Turbiedad (NTU)		Á. Láctico / Brix	
			App UVC	Control	App UVC	Control	App UVC	Control	App UVC	Control	App UVC	Control	App UVC	Control
5 W	1	0	49,7	48,5	6,45	6,46	2499	2490	7,55	7,55	23925	23550	7880,795	8013,245
	1,1	8	49,2	48,6	6,33	6,39	2499	2498	7,56	7,55	21475	23350	9821,429	9470,199
	1,2	16	49	48,7	6,3	6,35	2546	2549	7,55	7,56	23300	22900	10794,7	9325,397
	1,3	24	48,8	49,8	6,24	6,29	2591	2575	7,55	7,56	22275	23325	11059,6	10350,53
	1,4	32	48,7	50,2	6,13	6,22	2635	2596	7,55	7,56	21425	22475	11854,3	9589,947
	1,5	40	49,1	50,9	6,1	6,17	2677	2639	7,57	7,53	20925	21375	12912,81	11786,19
	1,6	48	50,6	51,5	6,02	6,05	2703	2686	7,56	7,59	21400	24125	14153,44	14130,43
	1,7	56	50,8	52,1	5,92	5,92	2742	2723	7,57	7,57	20500	21950	16182,3	13143,99
	1,8	120	42,2	40,3	5,53	5,49	2959	2976	7,21	7,16	21425	24650	20804,44	20949,72
7 W	3	0	53,1	51,8	5,55	5,55	3021	3028	7,67	7,67	19500	18550	24380,7	23924,38
	3,1	8	52,3	50,2	5,55	5,42	3047	3090	7,66	7,66	16000	17950	27088,77	27480,42
	3,2	16	52	60,5	5,49	5,37	3060	3110	7,66	7,64	17450	16950	25979,11	27094,24
	3,3	24	51,6	60,1	5,46	5,37	3082	3120	7,67	7,67	17450	16750	28292,05	24771,84
	3,4	32	51,3	60,4	5,39	5,26	3105	3171	7,68	7,68	19450	16850	28841,15	25911,46
	3,5	40	50,9	57	5,37	5,24	3122	3137	7,68	7,55	18700	13100	26888,02	24105,96
	3,6	48	50,6	54,9	5,35	5,24	3127	3163	7,68	7,55	16050	14300	25000	31655,63
	3,7	56	50,3	52,5	5,33	5,23	3144	3166	7,67	7,67	16400	12250	27444,59	26923,08
11 W	2	0	49,3	50,1	5,48	5,54	2967	2962	7,65	7,6	46600	24550	31503,27	22934,21
	2,1	8	50,3	51,2	5,41	5,47	2985	3006	7,65	7,61	43200	18700	25620,92	23718,79
	2,2	16	52,9	51,7	5,35	5,38	3074	3063	7,66	7,62	44900	20000	24151,44	22440,94
	2,3	24	55,5	52	5,28	5,33	3076	3117	7,67	7,63	54420	19950	31368,97	26146,79
	2,4	32	58,8	52,2	5,23	5,25	3073	3118	7,66	7,62	23940	22500	31488,25	31574,8
	2,5	40	61,8	52,5	5,05	5,21	3260	3157	7,67	7,61	23850	22240	32855,28	27963,21
	2,6	48	59,6	53	5,01	5,15	3232	3160	7,63	7,67	18720	16320	32503,28	29661,02
	2,7	56	58,3	53,4	4,95	5,11	3372	3243	7,68	7,63	18100	19800	33723,96	29554,39

Anexo 2. Datos de HPLC de jugo claro

Potencia	ID	Tiempo (min)	Sacarosa (% p/p)		Glucosa (% p/p)		Fructosa (% p/p)		AT (% p/p)	
			App UVC	Control	App UVC	Control	App UVC	Control	App UVC	Control
5 W	1.0 JF	0	9,75	6,5	0,14	<0.005	0,39	0,13	10,79	6,98
	1.1 JF	8	9,14	6,27	0,03	0,2	0,32	0,22	9,97	7,02
	1.2 JF	16	6,17	6,28	0	0,16	0,17	0,23	6,66	7
	1.3 JF	24	5,82	6,2	0,19	0,11	0,21	0,22	6,52	6,86
	1.4 JF	32	16,67	6,19	0,8	0,2	0,78	0,22	19,12	6,93
	1.5 JF	40	6,3	6,28	0,21	0,14	0,25	0,24	7,1	7
	1.6 JF	48	6,12	6,48	0,14	<0.005	0,22	0,26	6,8	7,08
	1.7 JF	56	6,02	6,29	0,17	0,14	0,22	0,25	6,73	7,01
	1.8 JF	6,46	6,21	6,2	0,06	<0.005	0,23	0,16	6,83	6,69
7 W	3.0 JF	0	7,53	5,75	0,06	0,13	0,13	0,19	8,11	6,37
	3.1 JF	8	6	6,15	0,06	0,12	0,84	0,21	7,21	6,8
	3.2 JF	16	6,91	6,04	0,06	0,1	0,13	0,2	7,46	6,66
	3.3 JF	24	6,56	6,26	0,07	0,13	0,12	0,21	7,09	6,92
	3.4 JF	32	6,77	5,32	0,06	0,09	0,12	0,17	7,3	5,86
	3.5 JF	40	6,63	5,96	0,06	0,005	0,12	0,18	7,15	6,45
	3.6 JF	48	6,64	6,09	0,06	0,005	0,12	0,18	7,16	6,6
	3.7 JF	56	6,46	6,21	0,06	0,05	0,13	0,12	6,98	6,7
11 W	2.0 JF	0	9	6,5	0,02	0,08	0,12	0,13	9,61	7,05
	2.1 JF	8	7,54	6,56	0,06	0,08	0,13	0,14	8,12	7,12
	2.2 JF	16	7,74	6,59	0,05	0,08	0,13	0,13	8,33	7,15
	2.3 JF	24	7,55	6,5	0,13	0,05	0,25	0,12	8,34	7,02
	2.4 JF	32	6,24	6,54	0,04	0,04	0,11	0,1	6,73	7,03
	2.5 JF	40	6,66	6,7	0,05	0,05	0,12	0,09	7,17	7,19
	2.6 JF	48	6,77	6,68	0,07	0,04	0,14	0,1	7,34	7,17
	2.7 JF	56	7,3	6,15	0,02	0,05	0,12	0,11	7,82	6,63
	2.8 JF	86	6,01	0,03	0,05	0,1	0,11	6,93	6,49	

Anexo 3. Datos de color de Jugo Filtrado

	Tiempo (min)	Color		
		5 W	7 W	11 W
Aplicación UV- C	0	10837,5	9624,9	5736,8
	16	10862,4	9664,7	5392,9
	32	11167,2	9927,1	4528,0
	48	10425,4	9841,4	6317,2
	Tiempo (min)	Color		
		5 W	7 W	11 W
Control	0	10550,0	10015,4	5994,1
	16	10935,6	9999,7	5800,8
	32	10793,9	9965,6	5795,0
	48	10387,9	10174,9	6214,7

Anexo 4. Datos de manitol de Jugo Filtrado

Potencia	Muestra	Tiempo (min)	Manitol/Brix	
			A	B
5 W	1.0 JF	0	2000,0	2066,2
	1.1 JF	8	1904,8	1947,0
	1.2 JF	16	2039,7	2050,3
	1.3 JF	24	2066,2	2050,3
	1.4 JF	32	2066,2	2076,7
	1.5 JF	40	1994,7	2085,0
	1.6 JF	48	2116,4	2081,7
	1.7 JF	56	2047,6	1994,7
	1.8 JF		2177,5	2206,7
7 W	3.1 JF	8	2154,0	2180,2
	3.3 JF	24	1355,9	2203,4
	3.5 JF	40	1367,2	2238,4
	3.7 JF	56	1342,9	1499,3

Anexo 5. Datos de Retornos Dulces

Potencia	ID	Tiempo (min)	T (°C)		pH		C (Ms/cm)		°Brix		Turbiedad (NTU)		Á. Láctico / Brix	
			A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
5 W	3	0	29,5	32,3	4,32	4,26	3494	3521	10,38	10,13	4335	3795	27023,1	24926,0
	3,1	8	30,4	33,2	4,32	4,27	3524	3546	9,36	9,95	4200	3425	25908,1	25276,4
	3,2	16	31,8	33,8	4,32	4,28	3503	3547	10,26	10,37	4245	3820	27777,8	25342,3
	3,3	24	35,6	34,7	4,32	4,28	3537	3566	10,25	10,13	4320	3870	24731,7	24926,0
	3,4	32	37	35	4,31	4,27	3538	3552	10,23	10,11	4050	3830	29325,5	24134,5
	3,5	40	37,8	35,2	4,31	4,27	3567	3571	10,26	10,09	5350	4165	24561,4	23439,0
	3,6	48	37,8	35,3	4,31	4,28	3602	3579	10,21	10,08	4255	3995	26542,6	25248,0
	3,7	56	37,7	35,7	4,31	4,27	3589	3581	10,2	9,8	4500	4130	22647,1	26734,7
7 W	2	0	34,9	30,9	4,31	4,3	3495	3263	10,42	9,61	4745	4040	21977,0	25130,1
	2,1	8	36,6	31,8	4,3	4,31	3480	3526	10,59	10,21	4035	4475	24834,7	25759,1
	2,2	16	37	33	4,29	4,32	3499	3555	10,34	10,29	4555	4025	27949,7	24781,3
	2,3	24	37	33,6	4,29	4,31	3487	3530	10,35	10,29	4580	4205	25845,4	25801,7
	2,4	32	36,8	34	4,29	4,32	3484	3536	9,73	10,29	4330	4170	24254,9	21768,7
	2,5	40	36,5	33,2	4,29	4,31	3491	3543	10,28	10,26	4540	4170	25000,0	25243,7
	2,6	48	36,4	33,1	4,29	4,31	3495	3538	10,26	10,24	4635	4355	23001,9	23388,7
	2,7	56	36,1	32,6	4,28	4,31	3516	3553	10,24	10,24	5100	4540	24511,7	25293,0
11 W	1	0	34,4	33,4	4,33	4,33	3510	3416	10,33	10,33	4760	4210	22884,8	21152,0
	1,1	8	34	33,1	4,34	4,33	3511	3412	10,32	10,33	4295	4085	23158,9	23281,7
	1,2	16	34	33	4,31	4,32	3440	3410	10,26	10,32	4520	3935	22612,1	23595,0
	1,3	24	33,8	33,8	4,31	4,35	3450	3404	10,31	10,32	4640	3850	21290,0	19961,2
	1,4	32	33,6	33,9	4,3	4,34	3457	3449	10,29	10,31	4485	4050	20942,7	23035,9
	1,5	40	33,5	33,8	4,3	4,33	3438	3426	10,31	10,25	4520	3920	22890,4	21951,2
	1,6	48	33,3	33,9	4,3	4,33	3464	3439	10,28	10,31	4605	4150	21887,2	21047,5

Anexo 6. Datos de color de Retornos Dulces

	Color (UI)		
	5 W	7 W	11 W
Aplicación UV-C	21725,4	23727,0	19073,1
	22555,9	23281,7	22359,8
	22220,5	22087,8	24140,9
	23617,7	22185,3	23414,1
	Color (UI)		
	5 W	7 W	11 W
Control	23844,5	24848,0	24985,5
	24082,4	23864,3	24426,5
	22510,9	21071,9	25260,5
	23487,8	20897,0	23719,3

Anexo 7. Datos de HPLC de Retornos Dulces

Potencia	ID	°Brix		Manitol / Brix		Sacarosa (% p/p)		Glucosa (% p/p)		Fructosa (% p/p)		AT (% p/p)	
		App UVC	Control	App UVC	Control	App UVC	Control	App UVC	Control	App UVC	Control	App UVC	Control
11 W	1	10,33	10,33	1723,1	1084,2	3,7	3,7	1,58	1,73	1,89	2,07	7,36	7,69
	1,1	10,32	10,33	1598,8	1181,0	3,78	3,55	1,6	1,63	1,93	1,89	7,51	7,26
	1,2	10,26	10,32	1656,9	1172,5	3,77	4,41	1,63	1,83	1,97	2,16	7,57	8,63
	1,3	10,31	10,32	1881,7	1133,7	3,7	3,7	1,64	1,72	1,96	2,06	7,5	7,67
	1,4	10,29	10,31	1875,6	1144,5	3,67	3,59	1,63	1,71	1,97	2,07	7,48	7,55
	1,5	10,31	10,25	1309,4	1239,0	3,43	3,83	1,56	1,76	1,9	2,11	7,07	7,89
	1,6	10,28	10,31	1293,8	999,0	3,55	4,73	1,62	1,83	1,98	2,16	7,33	8,98
7W	2	10,42	9,61	1314,8	1144,6	3,38	3,05	1,7	1,69	2,07	2,08	7,33	6,99
	2,1	10,59	10,21	1227,6	1234,1	3,19	2,92	1,57	1,69	1,92	2,09	6,86	6,85
	2,2	10,34	10,29	1305,6	1205,1	3,44	3,04	1,72	1,71	2,1	2,15	7,43	7,06
	2,3	10,35	10,29	1323,7	1156,5	3,36	2,99	1,71	1,69	2,1	2,08	7,34	6,92
	2,4	9,73	10,29	1346,4	1127,3	3,5	3	1,7	1,68	2,08	2,08	7,47	6,92
	2,5	10,28	10,26	1313,2	1130,6	3,12	3,13	1,71	1,78	2,12	2,22	7,12	7,29
	2,6	10,26	10,24	1413,3	1113,3	3,11	2,9	1,76	1,69	2,19	2,08	7,21	6,83
	2,7	10,24	10,24	1318,4	1074,2	2,84	3,4	1,58	1,84	1,96	2,34	6,52	7,75
5W	3	10,38	10,13	1213,9	1076,0	3,18	2,51	1,66	1,58	2,01	2,01	7,03	6,23
	3,1	9,36	9,95	1463,7	1336,7	3,21	2,68	1,68	1,69	2,06	2,14	7,11	6,65
	3,2	10,26	10,37	1257,3	1205,4	3,21	2,84	1,69	1,68	2,04	2,13	7,1	6,81
	3,3	10,25	10,13	1239,0	1234,0	3,2	2,62	1,8	1,68	2,21	2,12	7,37	6,56
	3,4	10,23	10,11	1231,7	1384,8	3,16	2,63	1,79	1,71	2,23	2,17	7,35	6,65
	3,5	10,26	10,09	1198,8	1258,7	3,25	2,65	1,86	1,71	2,32	2,15	7,59	6,65
	3,6	10,21	10,08	1341,8	1309,5	3,52	2,53	2,06	1,69	2,57	2,16	8,34	6,51
	3,7	10,2	9,8	1343,1	1224,5	3,88	2,73	1,96	1,72	2,43	2,16	8,47	6,75

Anexo 8. Datos de ácidos orgánicos de Retornos dulces.

Potencia	ID	°Brix		Trans Aconítico / Brix		Láctico / Brix		Acético / Brix	
		App UVC	Control	App UVC	Control	App UVC	Control	App UVC	Control
11 W	1	10,33	10,33	2623,4	2613,7	23223,6	24791,9	10135,5	10213,0
	1,1	10,32	10,33	2616,3	2855,8	23030,0	24172,3	9651,5	9835,4
	1,2	10,26	10,32	2709,6	4534,9	23998,1	25663,1	9883,8	10367,9
	1,3	10,31	10,32	2599,4	3207,4	22526,6	24607,9	9380,4	10125,8
	1,4	10,29	10,31	2896,0	3016,5	23775,4	24230,4	9864,5	9961,3
	1,5	10,31	10,25	2657,6	3395,1	23039,7	24549,9	9574,1	10106,5
	1,6	10,28	10,31	2344,4	5809,9	22110,4	25227,5	9109,4	15324,3
7W	2	10,42	9,61	2399,2	2778,4	23243,0	24472,4	9525,7	10000,0
	2,1	10,59	10,21	2200,2	2634,7	21800,6	24685,4	8722,2	10116,2
	2,2	10,34	10,29	2475,8	2623,9	24036,8	24840,3	9651,5	10203,3
	2,3	10,35	10,29	2434,8	2672,5	24056,1	25072,6	9719,3	10329,1
	2,4	9,73	10,29	2548,8	2925,2	23746,4	24840,3	9738,6	10145,2
	2,5	10,28	10,26	2616,7	2651,1	24995,2	25033,9	11103,6	10261,4
	2,6	10,26	10,24	2582,8	2724,6	24482,1	25353,3	10164,6	10416,3
	2,7	10,24	10,24	2353,5	3681,6	22516,9	29680,5	8915,8	12333,0
5W	3	10,38	10,13	2659,0	2497,5	24375,6	24191,7	10396,9	9893,5
	3,1	9,36	9,95	2948,7	2653,3	24191,7	25285,6	10251,7	10358,2
	3,2	10,26	10,37	2660,8	3751,2	24191,7	26389,2	10242,0	10513,1
	3,3	10,25	10,13	3161,0	2675,2	29438,5	25547,0	12168,4	10493,7
	3,4	10,23	10,11	2952,1	2601,4	28044,5	26156,8	11413,4	11103,6
	3,5	10,26	10,09	3284,6	2448,0	31297,2	26234,3	12546,0	10571,2
	3,6	10,21	10,08	2952,1	2601,4	28044,5	26156,8	11413,4	10513,1
	3,7	10,2	9,8	4421,6	2510,2	28538,2	26602,1	12100,7	10764,8

Anexo 9. Datos del tratamiento aplicado a Jugo Claro

Potencia	ID	T (°C)		pH		C (Ms/cm)		°Brix		Turbiedad (NTU)		A. Láctico / Brix	
		R	S	R	S	R	S	R	S	R	S	R	S
5 W	6	50,3	47,7	6,94	6,9	5333	5350	18,21	18,12	215	232	242,7	285,9
	6,1	48,9	46,8	6,89	6,91	5300	5340	18,2	18,18	340	245	187,9	276,1
	6,2	49,1	46,7	6,9	6,94	5332	5331	18,23	18,19	228	259	286,3	310,6
	6,3	49,8	46,2	6,87	6,95	5379	5365	18,15	18,15	227	220	284,3	290,9
	6,4	49,9	45,9	6,87	6,95	5361	5350	18,25	18,2	230	236	276,7	280,8
	6,5	50	46,3	6,84	6,95	5360	5365	18,28	18,21	214	231	275,7	299,3
	6,6	50	46,3	6,81	6,96	5380	5327	18,23	18,12	226	242	289,6	306,3
	6,7	50	45,9	6,8	6,96	5378	5330	18,27	18,18	226	225	1746,0	315,7
	6,8	50	45,8	6,78	6,96	4905	5350	18,07	18,25	223	226	252,9	284,9
7 W	4	50,3	45	6,79	6,85	4209	4189	12,85	12,75	276	267	346,3	349,0
	4,1	49,1	45	6,76	6,85	4216	4194	12,85	12,75	279	264	356,4	370,2
	4,2	52,7	45,8	6,77	6,88	4218	4182	12,83	12,78	265	277	327,4	348,2
	4,3	53,1	45,8	6,77	6,89	4214	4190	12,88	12,77	266	257	366,5	330,5
	4,4	52,3	46,1	6,76	6,9	4219	4190	12,88	12,76	277	263	351,7	398,9
	4,5	51	46,2	6,75	6,9	4219	4184	12,88	12,73	281	257	353,3	399,8
	4,6	49,9	46,2	6,76	6,91	4218	4188	12,9	12,78	280	259	375,2	345,9
	4,7	48,7	45,3	6,74	6,91	4228	4190	12,89	12,79	266	264	425,9	438,6
11 W	5	51,3	42,6	6,74	6,84	4239	4214	12,98	12,87	351	282	406,0	400,9
	5,1	50,4	45,4	6,78	6,87	4232	4213	12,99	12,9	378	438	431,9	419,4
	5,2	49,4	47,6	6,76	6,86	4233	4218	13,01	12,91	322	439	372,0	399,7
	5,3	48,5	49	6,8	6,89	4237	1207	13	12,94	330	303	358,5	430,4
	5,4	48	50,1	6,78	6,91	4227	4208	13,02	12,88	316	305	369,4	368,8
	5,5	49,2	51,2	6,75	6,88	4233	4218	12,99	12,85	297	320	357,2	362,6
	5,6	49,8	51,4	6,75	6,87	4250	4241	12,96	12,92	294	286	331,0	360,7
	5,7	49,9	50,8	6,74	6,87	4249	4233	12,9	12,89	308	310	403,1	432,1

Anexo 10. Datos de HPLC de jugo claro

Potencia	ID	°Brix		Á. Cítrico / Brix		Láctico / Brix		Acético / Brix	
		App UVC	Control	App UVC	Control	App UVC	Control	App UVC	Control
5 W	6	18,21	18,12	1043,4	1258,3	2048,3	1810,2	1169,7	965,8
	6,1	18,2	18,18	890,1	1067,1	1812,2	1870,9	928,1	921,6
	6,2	18,23	18,19	954,5	1077,5	1762,8	1782,6	928,1	927,2
	6,3	18,15	18,15	1090,9	1184,6	1971,4	1628,0	988,5	866,4
	6,4	18,25	18,2	1022,5	1244,2	1916,5	1793,6	988,5	952,0
	6,5	18,28	18,21	962,8	1230,1	1861,6	1771,5	988,5	1114,8
	6,6	18,23	18,12	1108,1	1302,4	2114,2	1672,2	983,0	938,2
	6,7	18,27	18,18	1001,6	1793,2	1812,2	2058,5	1065,3	1357,6
	6,8	18,07	18,25	1189,8	1523,3	2081,3	1804,6	1087,3	1197,6
7 W	4	12,85	12,75	887,2	902,0	1208,1	1109,3	840,2	711,9
	4,1	12,85	12,75	996,1	878,4	1350,9	1125,8	818,2	651,2
	4,2	12,83	12,78	865,2	1009,4	1087,3	1225,2	653,5	711,9
	4,3	12,88	12,77	947,2	916,2	1285,0	1208,6	779,8	717,4
	4,4	12,88	12,76	1071,4	815,0	1158,7	987,9	774,3	618,1
	4,5	12,88	12,73	900,6	926,9	1032,4	1181,0	670,0	805,7
	4,6	12,9	12,78	1077,5	993,7	1164,2	1170,0	675,5	816,8
	4,7	12,89	12,79	969,7	938,2	1197,1	1181,0	768,8	717,4
11 W	5	12,98	12,87	1078,6	940,2	1191,7	1186,5	735,9	695,4
	5,1	12,99	12,9	1016,2	907,0	1169,7	1109,3	774,3	723,0
	5,2	13,01	12,91	983,9	898,5	1208,1	1147,9	752,3	910,6
	5,3	13	12,94	953,8	865,5	1235,6	1186,5	691,9	855,4
	5,4	13,02	12,88	898,6	916,1	1180,7	1114,8	779,8	678,8
	5,5	12,99	12,85	1162,4	965,0	1224,6	1197,6	779,8	734,0
	5,6	12,96	12,92	979,9	936,5	1125,8	1600,4	691,9	916,1
	5,7	12,9	12,89	1007,8	0,0	1268,5	0,0	823,7	0,0

Anexo 11. Datos de metabolitos de Jugo Claro.

Potencia	ID	°Brix		Sacarosa (% p/p)		Glucosa (% p/p)		Fructosa (% p/p)		AT (% p/p)		Manitol / Brix	
		App UVC	Control	App UVC	Control	App UVC	Control	App UVC	Control	App UVC	Control	App UVC	Control
5 W	6	18,21	18,12	16,82	17,47	0,37	0,39	0,39	0,3	18,47	19,08	818,2	827,8
	6,1	18,2	18,18	17,1	16,83	0,37	0,33	0,3	0,42	18,67	18,47	1241,8	825,1
	6,2	18,23	18,19	16,8	16,98	0,5	0,47	0,39	0,38	18,58	18,72	811,8	824,6
	6,3	18,15	18,15	16,68	15,9	0,4	0,31	0,44	0,41	18,4	17,45	832,0	787,9
	6,4	18,25	18,2	16,8	16,78	0,34	0,34	0,39	0,27	18,42	18,27	865,8	829,7
	6,5	18,28	18,21	16,27	16,62	0,4	0,33	0,55	0,31	18,07	18,13	951,9	845,7
	6,6	18,23	18,12	16,28	16,8	0,32	0,33	0,32	0,26	17,77	18,27	800,9	844,4
	6,7	18,27	18,18	16,68	16,51	0,4	0,32	0,34	0,4	18,3	18,1	837,4	858,1
	6,8	18,07	18,25	17	16,46	0,34	0,33	0,32	0,26	18,56	17,91	830,1	838,4
7 W	4	12,85	12,75	11,76	11,55	0,32	0,27	0,28	0,22	12,99	12,65	856,0	745,1
	4,1	12,85	12,75	11,77	11,26	0,32	0,26	0,28	0,21	12,99	12,33	863,8	737,3
	4,2	12,83	12,78	10,57	11,91	0,25	0,28	0,59	0,23	11,96	13,04	873,0	939,0
	4,3	12,88	12,77	11,41	11,86	0,3	0,3	0,26	0,25	12,58	13,02	861,8	712,6
	4,4	12,88	12,76	11,68	9,77	0,28	0,23	0,23	0,19	12,81	10,7	877,3	642,6
	4,5	12,88	12,73	10,32	11,75	0,25	0,27	0,21	0,23	11,32	12,87	823,0	1005,5
	4,6	12,9	12,78	11,78	11,55	0,31	0,27	0,26	0,22	12,96	12,65	852,7	696,4
	4,7	12,89	12,79	11,88	11,79	0,31	0,28	0,26	0,23	13,08	12,92	993,0	688,0
11 W	5	12,98	12,87	12,09	11,85	0,34	0,28	0,29	0,23	13,35	12,98	862,9	691,5
	5,1	12,99	12,9	12,17	11,32	0,33	0,27	0,28	0,22	13,41	12,42	831,4	697,7
	5,2	13,01	12,91	11,78	11,97	0,28	0,28	0,24	0,23	12,92	13,1	814,8	704,9
	5,3	13	12,94	11,58	11,9	0,29	0,27	0,24	0,23	12,72	13,03	784,6	703,2
	5,4	13,02	12,88	11,8	11,49	0,29	0,27	0,25	0,22	12,96	12,59	798,8	706,5
	5,5	12,99	12,85	11,98	12,05	0,29	0,28	0,24	0,23	13,13	13,2	785,2	700,4
	5,6	12,96	12,92	11,5	12,01	0,27	0,38	0,23	0,34	12,6	13,36	756,2	704,3
	5,7	12,9	12,89	11,95		0,3		0,25		13,13		759,7	744,8

Anexo 12. Datos de color de jugo claro

	Color (UI)		
	5 W	7 W	11 W
Aplicación UV-C	15599,0	19887,5	19616,9
	15306,9	19482,6	20204,5
	16119,8	19790,8	20132,0
	14715,7	19675,8	20212,4
	Color (UI)		
	5 W	7 W	11 W
Control	16926,6	19519,1	19795,3
	15462,3	19211,1	19114,1
	16585,9	19539,6	19486,1
	17057,0	19599,8	19545,1