

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA AGRARIA DE COLOMBIA

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería de Alimentos

Maestría en Ingeniería



Modelo de inactivación simulada para desinfección de cáscara de café en una cámara germicida con radiación ultravioleta mediante simulación de Montecarlo y análisis de imágenes

Opción de titulación

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de Magister en Ingeniería

Presenta:

José Luis Velásquez Sánchez

Dirigido por:

PhD. Javier Darío Hoyos Leyva

Nombre del evaluador

Presidente

_____ Firma

Nombre del evaluador

Secretario

_____ Firma

Nombre y Firma
Director de la Maestría

Nombre y firma
Director (ra) Departamento de
Ingeniería de Alimentos

Bogotá D.C.

Fecha (será el mes y año de aprobación del Consejo Técnico, Académico y Curricular)

Resumen

El café colombiano es reconocido mundialmente por su calidad y su papel en el comercio internacional. Sin embargo, la producción de más de 700,000 toneladas de residuos anuales, principalmente cáscaras de café, plantea desafíos ambientales y sanitarios. La investigación se centra en estudiar el efecto de la irradiación ultravioleta (UV) en estas cáscaras, para mitigar su alta carga microbiana. Mediante la variación de la distancia y tiempo de exposición del UV, se determinó la dosis requerida para la descontaminación. Además, se analizaron parámetros morfológicos y se emplearon ecuaciones de dinámica de radiación electromagnética en una cámara germicida industrial. Utilizando simulaciones de Monte Carlo, se estimó la cinética de inhibición de *Penicillium digitatum* y *Cladosporium cladosporioides*, hongos fitopatógenos presentes en cáscaras de café producidas en Colombia. Los resultados revelaron una significativa inactivación de ambos hongos tras la exposición a UV-C a 253.7 nm durante 1.25 min. Este enfoque ofrece una herramienta ~~valiosa~~ para el diseño de cámaras germicidas, permitiendo simular resultados precisos para configuraciones específicas de equipos.

Palabras clave: Café Colombiano; Infusión de cáscara de café; carga microbiana; Image J; diseño de equipos; sustentabilidad ambiental.

Abstract

The Colombian coffee sector is internationally renowned for its quality and role in global trade. However, the production of over 700,000 tons of waste annually, primarily coffee husks, poses environmental and sanitary challenges. This research focuses on studying the effect of ultraviolet (UV) irradiation on these husks to mitigate their high microbial load. By varying the distance and exposure time of UV, the required dose for decontamination was determined. Additionally, morphological parameters were analyzed, and electromagnetic radiation dynamics equations were employed in an industrial germicidal chamber. Using Monte Carlo simulations, the inhibition kinetics of *Penicillium digitatum* and *Cladosporium cladosporioides*, fungi commonly found in Colombian coffee husks, were estimated. The results revealed significant inactivation of both fungi following exposure to UV-C at 253.7 nm for 1.25 min. This approach provides a valuable tool for designing germicidal chambers, allowing for precise simulation of outcomes for specific equipment configurations.

Key words: Colombian coffee; Coffee husk infusion; Microbial load; Image J; Equipment design; Environmental sustainability.

Tabla de contenido

Resumen.....	2
Abstract.....	3
1. Introducción.....	11
2. Justificación.....	15
3. Marco Teórico.....	17
3.1 CAFÉ.....	17
3.1.1 Cáscara de café y usos.....	18
3.1.2 Propiedades fisicoquímicas.....	19
3.1.3 Infusiones a base de cáscara de café.....	20
3.1.4 Presencia de microorganismos patógenos en la fruta.....	21
3.1.5 Maduración del café y cambios de color.....	22
3.1.6 Modelos cromáticos en frutos de café.....	23
3.2 RADIACIÓN ULTRAVIOLETA.....	25
3.2.1 Luz ultravioleta para desinfección.....	26
3.2.2 Cámaras germicidas en la industria.....	27
3.2.3 Mecanismos de reparación celular.....	¡Error! Marcador no definido.
3.2.4 Dimerización del ADN.....	¡Error! Marcador no definido.
3.2.5 Ventajas de la desinfección.....	32
3.2.6 Ventajas de la desinfección por UV relativas a los costes.....	33
3.2.7 Dosis.....	33
3.3 PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES.....	34
3.3.1 Fundamentos Lagunaridad.....	35
3.3.2 DBC - Diferencial Box Counting.....	36
3.3.3 Fundamentos Box Counting.....	37
3.4 RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA DE ONDA BAJA.....	37
3.5 GAMMA -POISSON.....	47
3.6 MODELOS MATEMÁTICOS NO LINEALES PARA CURVAS DE INACTIVACIÓN.....	48
4. Objetivos.....	52

4.1	OBJETIVO GENERAL	52
4.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	52
5.	Metodología	53
5.1	ADQUISICIÓN DE DATOS PARA LA SIMULACIÓN	54
5.1.1	<i>Diseño experimental.....</i>	54
5.1.2	<i>Clasificación de madurez.....</i>	57
5.1.3	<i>Dimensión fractal</i>	59
5.1.4	<i>Textura basada en lagunaridad.....</i>	61
5.1.5	<i>Cálculo de áreas.....</i>	63
5.1.6	<i>Simulación de la absorbancia de cáscara de café mediante Monte Carlo.....</i>	63
5.1.7	<i>Modelado APM la Dosis de radiación UV sobre cáscara de café</i>	65
5.1.8	<i>Modelos de simulación</i>	67
5.2	MÉTODO DE SIMULACIÓN	68
5.2.1	<i>Capacidad de hongos control sobre simulación</i>	69
5.2.2	<i>Control de proceso - comportamiento de micelios.....</i>	71
5.2.3	<i>Distribución Gamma- Poisson en <i>Penicillium digitatum</i> y <i>Cladosporium cladosporioides</i>.....</i>	74
5.2.4	<i>Simulación crecimiento de microorganismos en sustrato de cáscara de café</i>	77
5.2.5	<i>Cinética de inactivación modelo Weibull.....</i>	80
6.	Resultados	85
7.	Discusiones.....	100
8.	Conclusiones.....	102
9.	Recomendaciones	104
10.	Bibliografía	106

ÍNDICE DE TABLAS

Figura 1. A. Partes del fruto de café, Fuente: (Jiménez, 2016), B. Sección transversal de una cereza de café madura. Fuente: (Del Castillo et al., 2017).	18
Figura 2. Caracterización de los estados de desarrollo y color medio de los frutos de café var. Colombia. Fuente: (Carvajal et al., 2011)	23
Figura 3. Espectro de luz, longitudes de onda de rango UV, Fuente: Autor.....	26
Figura 4. Modelo de irradiación UV sobre sustratos en la industria, Fuente: Autor	27
Figura 6. Mecanismo de reparación directa del ADN por fotoreactivación, catalizado por fotoliasas, el cual revierte la lesión del ADN inducido por luz UV. Fuente: (Tafurt Cardona & Marin Morales, 2014).....	31
Figura 7. Coordenadas cartesianas de la transferencia radiactiva sobre un sólidos en un plano cartesianos de tres ejes. Fuente: (Clocchiatti & Catelan, 2018)	39
Figura 8. Transferencia de radiación basado en la ley inversa al cuadrado para una fuente con geometría esférica, Fuente: (Gonzales, 2018).....	40
Figura 9. Transferencia de radiación basado en la ley inversa al cuadrado para una fuente con geometría esférica, Fuente: (Gonzales, 2018).....	43
Figura 10. Muestra de caras analizadas para una muestra de fruto de café. Fuente: Autor.....	55
Figura 11. Cáscaras de café distribuidas en pliegos de muestras para inicio de experimento, tiempo 0. Fuente: Autor.	56
Figura 12. Mediación de largo, ancho y profundidad de granos de café mediante ADI.59	
Figura 13. Dimensión fractal de cáscaras de café (ImageJ).....	61
Figura 14. Tratamiento de imágenes aplicando lagunaridad para parametrizar profundidad de cáscara.	62
Figura 15. Modelado 3d mediante algoritmo de lagunaridad Matlab y Fluid 3d. ...	63

Con formato: Sin Resaltar

Figura 16. Descripción de absorbancia sobre cáscara de café.....	64
Figura 17. Porcentaje de colonización por Cladosporium cladosporioides en la comunidad interna de frutos de café. Fuente (Pereira Galvão et al., 2005)	71
Figura 18. Mallado de la 100x 100 de cámara, cajas de residuo de cáscara y distribución de colonias.	73
Figura 19. Descripción visual de la dinámica simulada en el efecto inhibitorio del Dosis absorbida en la matriz PxP sobre Penicillium digitatum y Cladosporium cladosporioides.	74
Figura 20. Distribución Gamma-Poisson en la aleatoriedad de muestras de cáscaras en la cámara germicida. Fuente: Autor.	76
Figura 21. Simulación de Montecarlo aplicada a modelos de crecimiento microbiano para Penicillium digitatum (línea azul) y Cladosporium cladosporioides (línea roja)	79
Figura 22. Modelamiento Gompertz para resultados de simulación Penicillium digitatum y Cladosporium cladosporioides, línea azul representa los datos resultado de Matlab y línea naranja la aproximación al modelo Gompertz	81
Figura 23. Áreas superficiales en función de tiempo de exposición Radiación UV de 11 muestras estudiadas elegidas de forma aleatoria.	87
Figura 25. Simulación de Montecarlo para Absorbancia de cáscara de café. Fuente: Autor.....	89
Figura 26. Análisis estadístico, regresión de curva para los modelos A y B, equivalentes a el Submodelo y B respectivamente para este documento	92
Figura 27. Cantidad de dosis absorbida en cámara germicida.....	92
Figura 28. Distribución espectral de la intensidad de foco Phillips para 1 y 2 lámparas en el interior de la cámara germicida, submodelos AA y AB	94
Figura 30. Grafica de cinética de inhibición Cladosporium cladosporioides. Log (s) vs Dosis (kJ/cm ²). Fuente Autor	97

Figura 31. Grafica de cinética de inhibición *Penicillium digitatum*. Log (s) vs Dosis (kJ/cm²). Fuente Autor 98

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Coordinadas cromáticas de color de la epidermis de los frutos de café var. Colombia, Fuente : (Carvajal et al., 2011)	25
Tabla 2. Características de cámaras germicidas. Fuente: Autor	27
Tabla 3. Ventajas UV sobre fluidos y técnicas químicas fuente	33
Tabla 4. Exposición ultravioleta de 254 nm para una reducción de la carga microbiana de 4 log para la desinfección del agua potable Fuente: (Hoyer, 1998; Sastry et al., 2000).	50
Tabla 5. Dosificación ligera en frutas, verduras sometidas a diferentes propósitos hormonales. Fuente: (Mditshwa et al., 2017)	50
Tabla 6. Conversiones de parámetros L* a* b* a RGB de los datos de comparación y clasificación de granos de café. Fuente: Autor.	57
Tabla 7. Resultado del análisis estadístico de color para 30 muestras de fruto de café en 3 estados diferentes de madurez.	57
Tabla 8. Resumen de conteo de cajas para cada muestra de cáscara de café, ..	60
Tabla 9. Parámetros de simulación ambiente para ambos modelos.....	67
Tabla 10. Conteos totales de hongos filamentosos, humedad relativa y la actividad del agua de los granos de café durante la fermentación y el secado. Fuente (Silva et al., 2008)	70
Tabla 11. Resultado de la conversión cromática de color para las muestras. Los datos se presentan como el promedio \pm desviación estándar.....	86
Tabla 12. Parámetros para el diseño del modelo simulado bajo parámetros morfológicos de la cáscara de café. Los datos se presentan como el promedio \pm desviación estándar.	88
Tabla 13. Parámetros para el diseño del modelo simulado bajo parámetros morfológicos de la cáscara de café, Fuente: Autor	88

Tabla de siglas

<i>Nombre compuesto</i>	<i>Sigla</i>
Composición de color Rojo	R
Composición de color Verde	G
Composición de color Azul	B
Actividad de agua	Aw
coordenada cromática equivalente a tonalidad R/G	a*
coordenada cromática equivalente a tonalidad Y/B	b*
coordenada acromática equivalente a saturación	C*
coordenada acromática ángulo de tonalidad	h*
coordenada acromática equivalente a luminosidad	L*
Intensidad de radiación eléctrica o electromagnética	I
tiempo	t
gramos	g
Días después de antesis (Carvajal et al., 2011)	DDA
Días después de floración	DDF
---	HSI
Nanómetros	nm
vatios	W
Joulios	J
Pirimidinas de ciclobutano	CPD
Dosis de radiación UV	D
Longitud de onda	λ
dimensión fractal	Df
Diferencial box counting	DBC
Ángulo del solido	Ω
Frecuencia / modelo cinética de radiación	v
Área	A
Fujo de energía	E
Intensidad específica	Iv
Vector de propagación de intensidad	K
Volumen	V
Altura	h
Transmitancia	T
Constante (depende de la interpretación)	k
Concentración del medio absorbente	Ca
Absorbancia	A - Abs
Análisis digital de imágenes	ADI
Numeric Computing Sistem / sistema computacional numérico	NCS
Advanced process modelining / modelación de procesos avanzado	APM

1. Introducción

Las principales industrias en Colombia, como la petrolera, minera, manufacturera, alimentaria y de construcción, han comenzado a prestar mayor atención al impacto ambiental que generan como resultado de su actividad económica. Específicamente, la industria alimentaria ha mostrado un interés significativo en abordar aspectos como el desperdicio, la reutilización, la reducción de residuos, la contaminación hídrica y la huella de carbono. Esto se ha visto impulsado tanto por la conciencia ambiental como por las regulaciones gubernamentales que buscan mitigar los efectos negativos sobre el medio ambiente. En consecuencia, estas industrias tienen la necesidad de identificar metodologías para reducir la cantidad de desechos o residuos generados, siendo la creación de nuevos productos a lo largo de la cadena productiva una de las estrategias clave para aprovechar al máximo el material residual [\(Hernández, 2022\)](#)~~(Hernández, 2022)~~.

Uno de los principales productos que genera un alto impacto ambiental por material de desperdicio es el café, considerado como una de las bebidas más populares en el mundo, presenta sabor, aroma y color característicos y efectos benéficos para la salud; siendo uno de los productos básicos más comercializados a nivel mundial, con un consumo de 67,3 millones sacos de 60 kilogramos en el año 2022 (ICO, 2023).

El café es uno de los principales productos agrícolas que se exporta en Colombia y genera más de 2 millones de empleos directos e indirectos, lo que lo ha convertido en un producto relevante en el desarrollo económico y social [\(Sierra & Salazar, 2019\)](#)~~(Sierra & Salazar, 2019)~~. En 2021 se tuvo una producción de 12,6 millones de sacos de café verde en 2021 y ventas en el orden de los 11 billones de pesos, que representó un crecimiento del 12,8 % en las exportaciones, principalmente a Canadá y Estados Unidos (FNC, 2021).

En Colombia, la producción de café genera alrededor de 784.000 toneladas de residuos al año (Daniela & Arrieta, 2021). Estos residuos están comprendidos

Con formato: Color de fuente: Negro

principalmente por la cáscara de café, que se obtiene en las etapas de despulpado y desmucilaginado en donde quedan la piel y pulpa mucilago; la piel exterior corresponde al 7-8% y la pulpa al 40% que, por lo general, terminan contaminando fuentes hídricas (Goyena & Fallis, 2019). Adicionalmente, este subproducto cuenta con propiedades nutricionales beneficiosas para la salud y es conocido por su alto contenido en metabolitos secundarios, como la cafeína y los polifenoles, lo que permite considerarla como potencial fuente de antioxidantes (Mullen et al., 2013).

En la actualidad fincas generadoras y comercializadoras usan la cáscara de café principalmente como alimento para animales, abono orgánico, fertilizantes y biocombustibles (Gil Ruiz & Deaza Mancera, 2019). En algunas ocasiones, es deshidratada para hacer la preparación tipo infusión, como una alternativa sobre la misma línea productiva de bebidas listas para el consumo (Marcia Fuentes et al., 2020). Sin embargo, la cáscara de café es la parte del fruto que con mayor frecuencia presenta contaminación cruzada y lesiones (Chalfoun, 2010). Aun así, la cáscara de café tiene un potencial uso en infusiones, ya que la composición de este posee un alto contenido de polifenoles y una elevada capacidad antioxidante, estos, bioactivos son conocidos por sus propiedades beneficiosas para la salud, como la prevención de enfermedades cardiovasculares, neurodegenerativas y algunos tipos de cáncer (Arquímedes et al., 2021).

Algunos estudios han reportado que en cultivos de *Coffea arábica* se encontraron concentraciones de hongos como: *Colletotrichum sp.*, *Phoma sp.*, *Fusarium sp.*, *Cladosporium sp.* y *Penicillium sp.* en diferentes intensidades dependiendo de la etapa de desarrollo de los frutos del café, la mayor frecuencia e intensidad de colonización fue de *Cladosporium* observada en una zona considerada de buena calidad (Pereira Galvão et al., 2005). Así mismo, pruebas preliminares de patogenicidad indicaron que *Cercospora sp.* y *Colletotrichum sp.* pueden causar enfermedades en los granos de café, pero, el síndrome exacto de la enfermedad no es sencillo de replicar en ambientes aislados, lo que deja claro un potencial de concentración de hongos en cultivos (Silva et al., 2000).

En otro estudio, sobre la diversidad microbiana en fruto de café en diferentes estados de maduración, realizado en la región sur de Minas Gerais, *Cladosporium* se registró con mayor frecuencia con un porcentaje de 45.9%, seguido de *Fusarium* 38.8%, *Aspergillus* 2.2% y *Penicillium* 13.1%, además de los géneros *Monilia*, *Arthrobotrys* y *Beauveria* en proporciones más bajas (Arocho et al., 2015).

El uso de la pulpa de café para su aprovechamiento en productos alimentarios, cosméticos o medicinales implica el uso de métodos de desinfección que no afecten la estructura química de los metabolitos de interés (Serna Jiménez et al., 2018), en este sentido, el tratamiento con radiación ultravioleta (UV) es un método eficiente para prolongar la vida útil de los alimentos, es considerado de bajo costo y fácil implementación, requiere un corto tiempo de exposición y no afecta las características fisicoquímicas y sensoriales de los alimentos a bajas dosis ([Vázquez Correa, 2021](#))([Vázquez Correa, 2021](#)).

Los tratamientos de exposición de alimentos a radiación UV, se ejecutan regularmente sobre ambientes controlados donde se precisa la cepa de estudio sobre el alimento de interés, con el fin de evaluar la inactividad que producen diferentes dosis de radiación; sin embargo, debido a que al desarrollar el presente trabajo no se contaba con herramientas para la identificación y medición de agentes patógenos de cáscaras de café extraídas del fruto de la variedad *Coffea Arábica* de Silvania, Cundinamarca, se propuso realizar una caracterización de los parámetros morfológicos de la cáscara recolectada mediante el análisis digital de imágenes (ADI), con el objetivo de estimar la dosis de radiación UV absorbida por la materia y realizar 3 pruebas de simulación abarcando propiedades y variables a escala industrial junto con las características morfológicas de la cáscara de café, para así realizar una propuesta de inactivación sobre *Cladosporium cladosporioides* y *Penicillium digitatum*, comúnmente encontrados sobre la especie de *Coffea Arábica* en la zona tropical del continente de América.

2. Justificación

El sector cafetero es uno de los pilares más sólidos en la economía de Colombia, representando alrededor del 7% del PIB total en 2023. (Federacion de cafeteros, Colombia, 2023).

Esto a su vez genera una gran masa de residuo o subproducto de la cadena de producción, que regularmente contribuye en gran escala a la contaminación y problemas ambientales; lo que podría ser mitigado con el aprovechamiento de dichos ~~subproductos residuos~~ (Jiménez, Valenzuela, & Cortínez, 2018). Recientemente, se ha presentado un interés sobre la obtención de pulpa de café deshidratada para la preparación de infusiones, debido a su alto contenido de compuestos cafeína, alcaloides, taninos y polifenólicos (Yepes & Pernalet, 2021).

Por otro lado, la cáscara de café por lo general posee hongos en su etapa productiva que genera un impacto directo sobre la calidad y sabor. Estos generalmente se encuentran en la cáscara de café ya que es la capa de tejido celular expuesta al ambiente (Hernández Teyssier et al., 2023).

Regularmente en la industria, la implementación de radiación UV se emplea mediante el uso de cámaras germicidas industriales, las cuales tienen características específicas dependiendo de la necesidad y constantemente son utilizadas para hacer estudios e investigación más que para ser implementadas en cadenas de producción (Flores Gallegos et al., 2022; Ramos Veiga et al., 2021).

Hasta la fecha, no se encuentran documentados estudios sobre diseños de cámaras germicidas UV para cáscara de café, más, sin embargo, si se encuentran simulaciones de radiación UV en diferentes frutas y verduras con resultados de valor en la reducción de microorganismos. Así lo menciona (Rivera Pastrana et al., 2007)(Rivera Pastrana et al., 2007) quienes lograron una reducción logarítmica de 2,14 Log ~~CFU/UF~~/g y más de 4,05 Log ~~CFU/UF~~/g en *E. coli*. coli O157:H7 al exponer las cepas y cáscaras de arándanos a la luz ultravioleta a una intensidad de 20 mW/cm² durante 10 minutos.

Con formato: Fuente: No revisar la ortografía ni la gramática

La implementación de cámaras germicidas en la etapa de desinfección de la cáscara de café es una oportunidad que puede aumentar los estándares de calidad y propiciar nuevos empleos al creciente e importante gremio cafetero, además que contribuye con la tecnificación de la industria agropecuaria en Colombia y abre una ventana en la competición con industrias internacionales (Gómez Durán & Rodríguez, 2019).

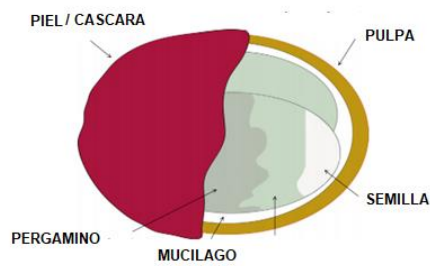
Por esto se plantea un modelo de simulación para analizar las condiciones de radiación UV requeridas para la inactivación de *Penicillium digitatum* y *Cladosporium cladosporioides* en cáscara de café, teniendo en cuenta el tiempo y distancia del haz de luz y parámetros morfológicos del producto. Para ello se utilizará las simulaciones de MonteCarlo, por ser un método ampliamente eficaz en la estimación de posibles resultados sobre una variable de incertidumbre, utilizando una distribución de probabilidad. La cual se utilizará en la determinación de absorbancia absoluta de la cáscara de café en el modelo de simulación, como una variable de incertidumbre, esto se debe al desconocimiento de absorbancia de cada compuesto químico que compone el fruto. Así mismo, el modelo MonteCarlo se utilizará en la simulación de la cinética de inactivación de los microorganismos basado en distribuciones semi aleatorias possom-gamma [\(Romero & Villareal, 2015\)](#).

Adicionalmente, el análisis de imágenes se utilizará como un método para determinar parámetros morfológicos en cáscara de café y parametrizar las variables morfométricas que se tendrán en cuenta en la simulación. [Los principales parámetros morfológicos que se midieron fueron distribución de área superficial, dimensión fractal, tamaño, largo y grosor.](#) La ciencia morfológica ha sido utilizada en la investigación para estudiar las estructuras externas de los alimentos. Esto permite parametrizar estados de madurez y aspectos físicos en diversos fenómenos de radiación UV.

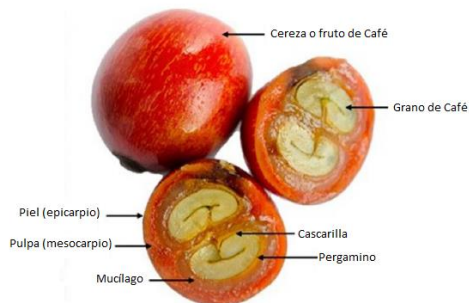
3. Marco Teórico

3.1 Café

El café es una planta perenne tropical que pertenece a la familia *Rubiaceae*. Hay alrededor de 102 especies de café, pero las dos principales son la *Arábica* y la *Canephora* (Esquivel & Jiménez, 2012). La *Arábica* es la más popular y tiene mayor presencia en los cultivos de Colombia, ya que tiene un mejor sabor y aroma. Además, se estima que esta especie resalta entre otras su concentración de fibra, celulosa, pectinas, ligninas y hemicelulosa. El fruto de café se compone de 3 capas; el exocarpio, el mesocarpio y el endocarpio, los cuales están compuestos por (piel-cáscara), (pulpa y mucilago) y (pergamino, semilla-grano) respectivamente (Osorio et al., 2021).



A



B

Figura 1. Descripción de partes que componen el fruto de café A. Partes del fruto de café, Fuente: (Jiménez, 2016), B. Sección transversal de una cereza de café madura. Fuente: (Del Castillo et al., 2017).

Con formato: Sin Resaltar

3.1.1 Cáscara de café y usos

La cáscara de café es la capa exterior que rodea el fruto de café, representa el 43,6 % del peso fruto fresco y contiene 86 % de actividad de agua. Es separada del fruto en la etapa de despulpado en el ciclo húmedo en la postcosecha del café; está compuesta por piel y pulpa del fruto. Debido a la alta proporción en el fruto de café y a que es un residuo, se cataloga como el causante de problemas ambientales asociados a este cultivo (Reinoso, 2022).

El uso tradicional de este residuo se enfoca en la obtención de abono orgánico, ya que no requiere procesos complejos y contribuye con las exigencias de las cooperativas en el ahorro de insumos y generación de valor agregado (Restrepo & Villa, 2020). Este favorece el crecimiento de cultivos, debido a que contiene nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio, azufre, hierro, cobre, magnesio, boro y zinc; usado regularmente en cultivos de café, plátano, frutales y hortalizas (Noriega Salazar et al., 2009a; Puerta Quintero & Ríos Arias, 2011).

El principal abono orgánico generado es con lombricultivos entre otros más artesanales y se estima por cada 10 toneladas de pulpa fresca se producen 1 tonelada de lombricompost (Restrepo & Villa, 2020). Otro uso empírico del sustrato de cáscara es el alimento para animales, por alto valor de nutrientes, proteínas y aporte energético. Se ha demostrado que este contiene niveles de fibra más altos que abonos a base de pasto comúnmente utilizado en rumiantes. Sin embargo, el uso excesivo de este puede causar daños en la salud de animales, puesto que contiene altos niveles de cafeína, taninos y polifenoles (Guaneme, 2023).

Otro uso de este sustrato es la creación de biocombustibles como bioetanol, biobutanol y biogás. Sin embargo, el inconveniente principal de este uso este asociado con la discontinuidad de cosecha del cultivo (Restrepo & Villa, 2020).

Existen usos biotecnológicos en cáscara de café, uno de ellos es fue la obtención de ácido láctico mediante procesos fermentativos en donde se ~~utilizan muestras~~ utilizan muestras de residuo para identificar microorganismos naturales presentes en la pulpa de café, obteniendo cepas de *Lactobacillus* Gram positivas. Como resultado se determinaron condiciones óptimas en procesos fermentativos con deshidratación parcial e hidrólisis acida; con 15% de pulpa, 2.50% de inóculo entre 24 a 60 h de fermentación, produciendo ácido láctico a 0.19 mg/L y 0.15 mg/L respectivamente, deduciendo que la mejor condición de crecimiento de *Lactobacillus* ocurre bajo deshidratación parcial (Hernandez & Ríos, 2020). Al igual que (Díaz Vela & Hernández Alvarado, 2018) determino que el sustrato de café obtenido por beneficio húmedo es un buen sustituto de la glucosa para bacterias ácido-lácticas. Así mismo, se determine que es un biocompuesto de gran valor en el crecimiento de *Pleurotus ostreatus*, combinado con bagazo de caña y aserrín en las siguientes proporciones (50 %, 25% y 25 %) (Vargas Cala & Aguilar Díaz, 2023).

Otros estudios de aprovechamiento de la cáscara de café han propuesta la obtención de infusiones, extractos antioxidantes, extractos de fibra, entre otros (Marcia Fuentes et al., 2020).

3.1.2 Propiedades fisicoquímicas

Por otro lado, la composición química de la cáscara de café, según (Pabón et al., 2021) está distribuida de la siguiente manera: contenido de humedad de 7,6%, materia seca 92,8%, extracto etéreo 0,6%, nitrógeno 0,39%, cenizas 0,5%, extracto libre de nitrógeno 18,9%, calcio y Magnesio 150 mg y fósforo 28 mg. Así mismo, (Osorio et al., 2021) determinaron que la cáscara aislada con pulpa está compuesta por materia seca 92%, extracto etéreo 2,6%, fibra cruda 20,8%, proteína cruda

10,7%, ceniza 8,8%, extracto libre de nitrógeno 49,2% y taninos 1,8% y coinciden en que el aislamiento produjo en el tiempo, la reducción en la actividad de agua.

De acuerdo con estudios realizados por [Marín López et al., \(2003\)](#) ~~Marín-López et al., (2003)~~, la cáscara de café presenta las siguientes propiedades: coeficiente calorífico es de aproximadamente 7458 Kcal/Kg, porcentaje de cenizas es de aproximadamente 0.9%, humedad media de 11.78%, material volátil de 87.7%, densidad aparente promedio 0.33 g / cm³. Adicional a esto un estudio realizado por (Puerta Quintero, 2012) que analizó las cualidades sensoriales de la cáscara de la especie *Coffea Arábica* en el sector cafetero de Colombia, determino que este compuesto contiene un aroma, acidez y amargor igual de fuerte al café molido.

3.1.3 Infusiones a base de cáscara de café

Las cualidades de esta infusión incluyen una variedad de nutrientes como carbohidratos, proteínas, taninos, minerales, potasio, azúcares y ácido clorogénico. Además, contiene un nivel de cafeína que oscila entre el 0.58% y el 0.68%, lo que la convierte en una bebida energizante, antioxidante y diurética. Su fragancia es fresca, con matices de frutas rojas y una suave acidez. Sin embargo, a pesar de estas características, actualmente no se ha desarrollado tecnología ni conciencia suficiente para aprovechar este subproducto (Serna-Jiménez et al., 2018).

Un estudio bajo el análisis sensorial de infusiones de cáscara de café Lempira para consumo humano, determinó que el 70.75% de los evaluadores prefieren la bebida hecha con cáscara de granos maduros, logrando un equilibrio entre sabor y acidez (Marcia, y otros, 2020). Además, esta biomasa es capaz de alcanzar hasta el 92% de actividad oxidante, equivalente a 2024,26 μM ET/g y contenido entre 200 y 350mg/L de fenoles, lo que corresponde a es un valor alto, en comparación con el té negro (Jiménez, Valenzuela, & Cortínez, 2018). Consideradas estas como una alternativa que puede ayudar a la prevención de enfermedades degenerativas y reduce el riesgo de padecer enfermedades crónicas, incluyendo obesidad y diabetes (Alfonso, 2014).

3.1.4 Presencia de microorganismos patógenos en la fruta

3.1.4 La cuantificación de hongos fitopatógenos en la cáscara y fruto de café ha sido un aspecto clave en las investigaciones recientes. Estudios de muestreo realizados en plantaciones de café han permitido estimar la carga microbiana de hongos en diferentes partes de la planta, incluyendo hojas, tallos, frutos maduros e inmaduros, y cáscaras de café procesadas. Los resultados indican que las cantidades de hongos varían significativamente entre las muestras y que ciertas especies pueden predominar en condiciones específicas, como la presencia de humedad o la exposición a la luz solar directa. Estos hallazgos sugieren la importancia de considerar la dinámica de las poblaciones fúngicas en la implementación de prácticas de manejo integrado de enfermedades en las plantaciones de café, con el objetivo de reducir el impacto negativo de los hongos fitopatógenos en la producción y calidad del cultivo (Arocho & Rodríguez, 2005; Acosta, Banuelos, & Aguilar, 2021).

Con formato: Normal

La mayoría de los informes sobre enfermedades de la fruta describen pruebas preliminares de patogenicidad donde han identificado a *Cercospora coffeicola*, *Fusarium solani*, *Fusarium oxysporum*, *Colletotrichum gloeosporioides* y *C. dematium* como patógenos primarios en la etiología de las manchas de las frutas de café (Arocho et al., 2015; Hernández Teyssier et al., 2023).

Los estudios recientes sobre hongos fitopatógenos en la cáscara y fruto de café han revelado una notable diversidad de cepas fúngicas presentes en las plantaciones de café. Se han identificado múltiples especies de hongos, incluyendo géneros como Colletotrichum, Fusarium, Alternaria y Botrytis, entre otros. Estas cepas varían en su morfología, fisiología y patogenicidad, lo que sugiere una compleja interacción entre los hongos y el cultivo de café. Además, se ha observado una variabilidad significativa en las cantidades de hongos presentes en diferentes regiones cafetaleras y en distintas etapas de desarrollo del fruto, lo que destaca la importancia de realizar muestreos exhaustivos y estudios longitudinales para

[comprender mejor la dinámica de las poblaciones fúngicas en los sistemas de producción de café \(Arocho & Rodríguez, 2005\).](#)

Elmer Arteaga (2018) realizaron una caracterización microbiológica en la cáscara y mucilago los cuales presentaron principalmente presencia de bacterias y levaduras. Para sustratos frescos luego del despulpado y desmucilaginado se identificaron, *Enterobacter*, *Staphylococo*, *Serratia*, *Candida*, *Torulopsis*, *Rhodotorula*, *Escherichia* y *Citrobacter*. Cuando la biomasa se almaceno durante 2 semanas, se fermento y se identificó presencia de *Aspergillus*, *Candida*, *Escherichia*, *Streptomyces*, *Fusarium*, *Geotrichum*, *Pseudomonas* y *Sarcina*. Esto quiere decir La cáscara de café, rica en nutrientes, se convierte en un sustrato propicio para el crecimiento acelerado de fitopatógenos durante los procesos fermentativos, en comparación con otros productos agrícolas.(Salazar Téllez et al., 2022).

3.1.5 Maduración del café y cambios de color

El color de la cáscara de café depende del estado de madurez del fruto y esto incide sobre la concentración de compuestos que lo componen (polifenoles, celulosa y ligninas) (Ramos et al., 2010), los cuales, dependiendo del grado de concentración, determinan la acidez de la cereza del café. Dependiendo del estado de madurez se realiza la recolección de frutos en cosecha. Carvajal et al. (2011) establecieron criterios para la clasificación de fruto de café establecidas por una estimación de días de maduración, denominada (DDA), realizaron un análisis de coordenadas cromáticas del color, representadas así: $L^*a^*b^*$ y $L^*C^*h^*$, como muestra en la figura 2.





DDA	Muestreo	Fruto	Color medio
182			
189			
196			
203			
210			
217			
224			
231			
238			

Figura 2. Caracterización de los estados de desarrollo y color medio de los frutos de café var. Colombia. Fuente: (Carvajal et al., 2011)

Este criterio de clasificación del estado de madurez del fruto nos sirve como referencia y criterio de evaluación para identificar el grado de madurez que tienen los frutos estudiados en este trabajo.

3.1.6 Modelos cromáticos en frutos de café

El grado de madurez es la principal característica de un grano de café apto para la producción. Para determinarlo, se analizan las características de color del grano, especialmente utilizando los modelos de color RGB, HSI y Lab* (Alonso, 2009).

El modelo HSI presenta una gran ventaja sobre el modelo RGB: describe los colores de forma similar a como lo hacen los humanos, en términos de matiz y saturación.

En cambio, el modelo RGB se basa en la proporción de colores primarios (rojo, verde y azul) para representar la reproducción del color (Puerta Quintero, 2012).

Las imágenes de estudio utilizadas son en formato RGB, por lo que es necesario convertirlas al espacio de color HSI para evaluar el estado de madurez y categorizar su composición en la simulación (Niño Sandoval & Flavio Ortiz, 2007)

Ecuación 1

$$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{0.5[(R - G) + (R - B)]}{[(R - G)^2 + (R - B)]^2}\right)$$

Ecuación 2

$$H = \theta \text{ si } B \leq G \text{ y } H = 360 - \theta$$

Ecuación 3

$$S = 1 - \frac{3}{(R + g + B)} [\min(R, G, B)]$$

Ecuación 4

$$I = \frac{R+G+B}{3}$$

Donde θ representa el ángulo del vector de color en cono cromático, S representa la saturación del color, I intensidad de color, R componente rojo, G componente verde y B componente azul. El análisis de imágenes que se realizó depende de la matriz de componentes RGB, la importancia de la conversión de colores HSI y Lab nos ayudó a clasificar los frutos estudiados y determinar el grado de maduración. La Tabla 1 describe los rangos de clasificación de la madurez del fruto.

Tabla 1. Coordenadas cromáticas de color de la epidermis de los frutos de café var. Colombia.

DDA	L*	a*	b*	c*	h*
210	44,7 g ±6,38	-7,18 b ±14,03	24,18 d ±16,52	25,27 d ±15,13	106,93 ef ±3,25
217	49,8 ±9,47	-1,37 e ±534,47	24,5 d ±18,27	25,71 e ±14,97	92,57 d ±19,68
224	37,88 e ±11,54	16,79 e ±30,33	11,74 b ±47,51	21,4 b ±20,24	34,04 e ±48,8
231	35,94 b ±9,1	17,9 f ±18,75	11,81 b ±34,9	21,77 b ±17,31	32,86 b ±29,69
238	30,5 a ±4,32	9,7 d ±34,81	2,76 a ±48,99	10,12 a ±34,99	15,74 a ±33,58

* Letras diferentes en la misma columna indican diferencia estadística según prueba de Duncan al 5%. Fuente: (Carvajal et al., 2011).

3.2 Radiación ultravioleta

La luz ultravioleta es una forma de radiación electromagnética con una longitud de onda corta. Es utilizada en aplicaciones germicidas porque rompe los enlaces de hidrógeno en el ADN de los microorganismos, provocando una inestabilidad en la cadena y evitando que se repliquen. La luz ultravioleta tiene una longitud de onda más larga que la de los rayos X, pero no puede ser percibida por el ojo humano porque está fuera del rango visible (Ruiz Cruz et al., 2019).

Una de las inquietudes e incertidumbres sobre el uso de la luz ultravioleta como método de desinfección de alimentos es que puede causar pérdida microestructural. Esto es más frecuente en fuentes de radiación ionizante, pero la luz ultravioleta no es ionizante. Sin embargo, la exposición prolongada de los alimentos a la luz ultravioleta puede provocar cambios organolépticos (Begum et al., 2009; Vasuja & S, 2018).

La luz ultravioleta se divide en cuatro categorías dependiendo de la aplicación que se desea realizar: UV-A (320-400 nm), UV-B (280-320 nm), UV-C (200-280 nm) y Vacío-UV (100-200 nm). La luz UV-C es la más germicida, específicamente entre 250 y 270 nm, y es la más efectiva para la desinfección a 254 nm (Mditshwa et al., 2017).

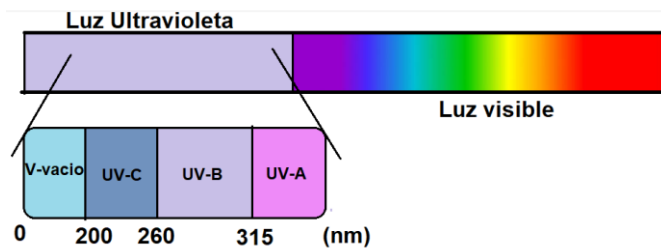


Figura 3. Espectro de luz, longitudes de onda de rango UV. Descripción del rangos al que pertenece la luz UV sobre el espectro ordenado por longitud de onda.

En la industria existe una amplia gama de lámparas UV sin embargo cada una de ellas tiene especificaciones y modo de uso variados. Las cuales se catalogan según la longitud de onda emitida, para el caso concreto en el uso germicida, las lámparas consisten en tubos de cuarzo que contienen un gas inerte en su interior, como argón, y pequeñas cantidades de mercurio. Las fuentes de radiación usadas pueden ser clasificadas en lámparas de baja y media presión de descarga de mercurio (Pombo 2009).

3.2.1 Luz ultravioleta para desinfección

Entre las aplicaciones más relevantes del uso de la luz ultravioleta en la industria, está la eliminación o inhibición de microorganismos sobre superficies de alimentos como frutas y vegetales, como también en afluentes de agua como método no invasivo. Así se ha documentado que cuando los microorganismos son expuestos a longitudes de onda de radiación UV-C, comprendidas entre (100-280nm), se ha comprobado que la longitud de onda entre 230 – 260 nm son más eficaces para romper los enlaces del ADN, sin embargo la resonancia producida en las moléculas de agua producto de la radiación UV-C es capaz de generar inhibición, esto causa una destrucción metabólica, afectando el mecanismo reproductivo y generando su inactivación o inhibición del crecimiento microbiológico (Paulo Sánchez et al., 2012).

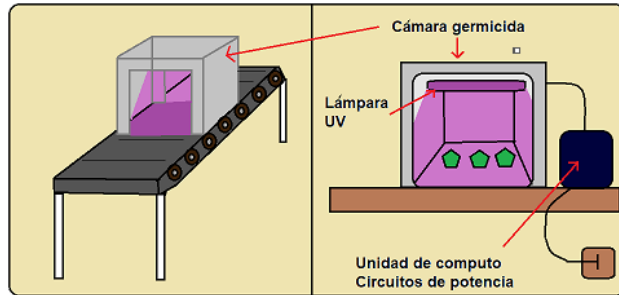


Figura 4. Modelo de irradiación UV sobre sustratos en la industria.

Con formato: Sin Resaltar

3.2.2 Cámaras germicidas en la industria

En la industria se utilizan varios equipos para el curado y esterilización mediante UV, que varían en función de su forma, capacidad, utilización de focos UV, programación y materiales. En general esta tecnología es ampliamente usada en laboratorios, aunque tiene alto potencial de uso a nivel industrial (Quintero Cerón et al., 2013).

Las cámaras más relevantes evaluadas para enfocar este trabajo de investigación son las siguientes.

Tabla 2. Características de cámaras germicidas. Fuente: Autor

Cámara germicida	Mecanismo de funcionamiento	Características	Especificaciones técnicas
Horno UV de baja presión SPDI: con bombillas UV-A, UV-B o UV-C	Cámara UV simple pero efectiva para aplicaciones de curado y germicida. Esta cámara tiene la característica de trabajar con nitrógeno, lo cual ofrece mejores indicadores de eliminación de mohos, además es capaz de ofrecer rayos UV-A, UV-B y UV-C, con longitud de onda variable, opciones a presión-medianas sistemas de alta intensidad que alcanzan hasta 550MW / cm ² .	<ul style="list-style-type: none"> - Estante ajustable en altura: Permite mover su sustrato más cerca o más lejos de la fuente de luz para optimizar sus procesos. - Puerta de metal y vidrio de seguridad: Sin importar cuál sea su aplicación, ya sea UV-A, UV-B o UV-C, no haya fuga ultravioleta cuando la puerta esté cerrada. - Área de cobertura UV de 8 "x 10" para adaptarse a la mayoría de las aplicaciones estándar. 	<ul style="list-style-type: none"> - Dimensiones generales: Ancho: 23.63 "(600 mm) x Profundidad: 23.63" (600 mm) x Altura: 25.4 "(645 mm) - Dimensiones interiores: Ancho: 17.00 "(430 mm) x Profundidad: 14.5" (368 mm) x Altura: 11 "(280 mm) - Peso: 50 lbs. - Opciones de lámpara UV: UV-A (320 nm a 400 nm), UV-B (290 nm a 320 nm) y UV-C (254 nm) - Configuración del temporizador: 1 a 9999 segundos (2 horas y 46 minutos).

		<ul style="list-style-type: none"> - Energía de 110 voltios Es capaz de ser conectada en una red eléctrica de América 	
Horno de cámara de laboratorio UV de intensidad variable	<p>Horno de luz UV-A con intensidad ajustable y cobertura uniforme</p> <p>La cámara de laboratorio de curado UV de intensidad variable de SPDIUV le proporciona una exposición uniforme a la luz ultravioleta en todo el estante ajustable de 41.4cm x 50.8cm.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Recinto de prueba de laboratorio UV autónomo y fácil de usar con estante de muestra ajustable de 41.4cm por 50.8cm (rango ajustable) - proporcionar un 98% de reflectividad, asegurando la máxima entrega de energía UV - Temporizador de inicio programable con función de apagado automático para la repetibilidad del ciclo. - Control programable de dosis UV: el temporizador de encendido / apagado se indica en minutos y segundos 	<ul style="list-style-type: none"> - El estándar en el control de dosis de emisión UV: opción de lámparas de baja presión UVA, UVB y UVC - Luces indicadoras de estado del sistema con señal de listo y enclavamiento de seguridad - La opción Nitro Purge, la cual sella el gabinete y agrega un relleno de 1/4 NPT, eliminando las válvulas de velocidad para que la unidad pueda conectarse a las líneas de nitrógeno de su laboratorio <p>Incluye un reflector UV iluminado electrónicamente diseñado para</p>
Horno LED de cámara de curado UV	<p>La cámara de curado LED UV es el sistema ecológico de luz FRÍA que necesita para su material sensible al calor.</p> <p>El curado UV es un proceso muy conveniente, reduce en gran medida el tiempo de secado. Sin embargo, ciertos materiales que necesitan ser curados con UV son sensibles al calor. Este problema puede dificultar aprovechar la rápida velocidad de curado de estos materiales con luces UV normales.</p>	<p>Los hornos LED no tienen tiempo de calentamiento, lo que significa que puede comenzar a usar la intensidad más alta disponible, varias opciones para sus diferentes necesidades de energía, la potencia máxima es de 1800 W. aunque maneja opciones de bajo consumo con potencias de 588 W y 300 W.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Luz LED fría UV - 365, 385, 395 y 405 nm de longitud de onda disponibles - Sin ozono ni mercurio - Respetuoso del medio ambiente - Simple de operar - Ahorro de electricidad - Rentable - Refrigeración por aire forzado - Temporizador de 9,999 segundos (2.77 horas)
Cámara de laboratorio de exposición UV de alta intensidad y curado total con temporizador y estante ajustable	<p>La cámara de laboratorio de curado por exposición UV de SPDIUV es un sistema independiente fácil de usar que es capaz de proporcionar una variedad de longitudes de onda y dosis de UV-A y UV-B.</p> <p>Esto se logra mediante la función de cambio fácil de la lámpara UV, la mesa de acero inoxidable de altura ajustable y el temporizador de dosificación programable con obturador. Con alto grado de ajuste y precisión con buenas utilidades y aplicaciones en</p>		<ul style="list-style-type: none"> - Salida de alta / baja potencia seleccionable - Control programable de dosis UV: el temporizador de encendido / apagado se muestra en minutos y segundos - Ventana de visualización Shade 5 con filtro UV para observación segura de sujetos / ciclos - Utiliza una entrada de alimentación estándar de 110 voltios - Rango de dosificación: 0 a 10 J / cm² durante 120 segundos

	laboratorios de alta precisión.		- Salida máxima: 500 mW / cm ² a 3 "
Cámara de esterilización para horticultura GermAwayUV	Horno de luz ultravioleta para horticultura con doble exposición para una esterilización rápida y completa	La cámara de esterilización para horticultura GermAwayUV es capaz de eliminar cualquier crecimiento de hongos parásitos de flores, adornos y productos vegetales. El sistema combina 2 fuentes de luz UV-C de alta potencia y un estante de placa de cuarzo 100% para emparedar efectivamente las flores con luz de limpieza y eliminar cualquier moho lo más rápido posible.	- La luz ultravioleta es la única forma práctica de erradicar el moho polvoriento y otros microbios dañinos de sus plantas sin usar productos químicos u otros agentes tóxicos.

3.2.3 Efecto de irradiación UV sobre las células

Las células tienen mecanismos sofisticados para monitorear la integridad del ADN, cuando hay defectos o errores en las hebras que forman su estructura, los mecanismos de reparación se activan. Los mecanismos de reparación restauran las conexiones de tejidos y células, lo que les brinda la oportunidad de sobrevivir y evitar daños en la estructura de su ADN (Rojas Lemus et al., 2024)

Los cambios en el ADN pueden conducir a la mutación, la muerte celular e interfiere con la síntesis de proteínas. Estos cambios pueden ser causados por diversos agentes, la luz ultravioleta, las radiaciones ionizantes y otros agentes endógenos y exógenos (Cifuentes Uribe, 2021; Tafurt Cardona & Marin Morales, 2014).

Si la dosis de luz ultravioleta es demasiado baja, algunos microorganismos pueden revertir el daño fotoquímico causado por la luz ultravioleta a través de la fotoactivación o reparación oscura. Sin embargo, algunos estudios han mostrado poca o ninguna posibilidad de fotoactivación a dosis superiores a 12 kJ/cm² (Restuccia et al., 2015).

Los sistemas de esterilización basados en radiación UV deben diseñarse con dosis de radiación suficientes para garantizar el daño celular y así evitar la reparación celular. La determinación de las dimensiones y propiedades debe basarse en la validación bioanalítica mediante pruebas de campo para garantizar suficiente radiación esterilizante para cada material o sustancia (Cataldo et al., 2017).

Es importante enfatizar la importancia de identificar la sustancia a irradiar, ya que los componentes individuales de la sustancia pueden cambiar a diferentes intensidades y longitudes de onda. La penetración de la luz ultravioleta en líquidos es más efectiva para la eliminación perimetral y absoluta de microorganismos; sin embargo, para algunas materias primas, esta intensidad de penetración no puede atravesar la capa superficial, pero puede cambiar sus propiedades sensoriales (Paulo Sánchez et al., 2012).

Asimismo, la composición del objeto o material irradiado tiene una influencia muy fuerte en el efecto terapéutico. La mayor parte de la evidencia sugiere que el sustrato alimentario en sí mismo (composición química y secuencia estructural) juega un papel importante en el daño del ADN microbiano inducido por la exposición a los rayos UV-C, ya que dosis similares de UV-C tienen diferentes efectos sobre el crecimiento microbiano de la misma especie microbiana. Por ello, la evaluación de esta tecnología en cada producto individual es relevante, permitiendo definir las condiciones óptimas de uso y posibles cambios en la calidad (Macarena, 2022; Rivera Pastrana et al., 2007).

Además, la temperatura, la humedad y la concentración de gases, la absorción del medio y los materiales, la refracción del medio y la geometría del medio radiante afectan la dosis de radiación, que varía según el tiempo y la intensidad de la radiación recibida por los microorganismos. Además, estas condiciones afectan mucho a la etapa reproductiva de la cepa, que en condiciones óptimas reduce o elimina su actividad metabólica. Esto se debe a que los perfiles metabólicos de los microorganismos varían con las condiciones de crecimiento (Tafurt Cardona & Marin Morales, 2014).

3.2.4 Mecanismos de inactivación de microorganismos por radiación UV

La radiación UV-C puede inactivar microorganismos al formar dímeros de pirimidina en el ADN. Los dímeros de pirimidina son dos bases nitrogenadas que se unen entre

sí, lo que interrumpe la hélice del ADN y bloquea la replicación de las células microbianas. Esto altera la capacidad reproductiva y otras funciones celulares de los microorganismos, lo que puede provocar su muerte (Correa et al., 2020; Paulo Sánchez et al., 2012).

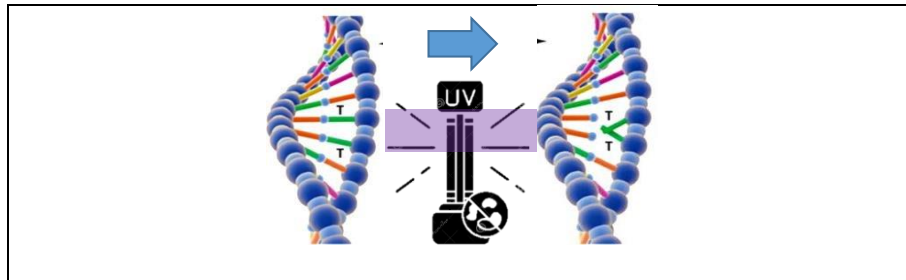


Figura 6. Mecanismo de reparación directa del ADN por fotoreactivación, catalizado por fotoliasas, el cual revierte la lesión del ADN inducido por luz UV. Fuente: (Tafurt Cardona & Marin Morales, 2014)(Tafurt Cardona & Marin Morales, 2014)

Con formato: Fuente: Sin Cursiva, Color de fuente: Negro

La resistencia de los microorganismos al tratamiento con radiación UV-C depende principalmente de su capacidad para reparar el ADN dañado. En términos generales, se ha observado que los microorganismos Gram negativos son más vulnerables a la radiación UV-C que los Gram positivos. A su vez, los Gram positivos son más susceptibles que las levaduras, bacterianas, hongos y virus. Esta variabilidad en la sensibilidad sugiere una diversidad de mecanismos de defensa y reparación del ADN entre los diferentes tipos de microorganismos frente a la radiación UV-C (Castro & Chávez Espinoza, 2022).

Con formato: Fuente: Color de fuente: Negro

La radiación UV-C con longitudes de onda entre 250 nm y 320 nm provoca cambios químicos en las bases del ADN. Estos cambios químicos se denominan foto productos y pueden tener efectos nocivos, como la inhibición de la replicación y la transcripción, lo que conduce a mutaciones, retraso del ciclo y muerte celulares (Valero et al., 2007).

Sin embargo, algunos de los efectos mutagénicos de la radiación UV-C pueden ser contrarrestados por la fotoactivación. La fotoactivación es un proceso catalizado por

fotoliasas, que son enzimas que utilizan la energía de la luz para revertir los fotoproductos.

3.2.5 Ventajas de la desinfección

La radiación ultravioleta de baja longitud de onda (UV-C) es un método limpio y eficaz para esterilizar objetos, productos, alimentos y maquinaria. Se ha utilizado durante más de dos décadas en la esterilización de equipos médicos y no genera ningún tipo de radioactividad.

En la industria alimentaria, se utilizan comúnmente compuestos químicos para matar microorganismos. Sin embargo, estos compuestos pueden alterar la composición fisicoquímica de los alimentos, cambiando su olor y sabor. Además, algunos microorganismos son resistentes a los compuestos químicos (Pilicita Garrido & Cevallos Duque, 2019).

La eliminación de microorganismos mediante métodos físicos ha tenido una gran importancia en los últimos años. Algunos de los métodos físicos incluyen la aplicación de calor y radiación.

La radiación UV-C tiene varias ventajas sobre otros métodos de desinfección (Cataldo et al., 2017):

- Es un proceso libre de sustancias químicas que no añade ninguna sustancia que pueda alterar las propiedades organolépticas de los alimentos y el agua.
- No requiere transporte, almacenamiento ni manipulación de sustancias químicas tóxicas o corrosivas.
- No genera subproductos carcinógenos de la desinfección.
- Es muy eficaz en la inactivación de una gran diversidad de microorganismos, incluidos patógenos resistentes al cloro como *Cryptosporidium* y *Giardia*.
- Se puede utilizar para descomponer los contaminantes químicos tóxicos a la vez que desinfecta.

Tabla 3. Ventajas UV sobre fluidos y técnicas químicas fuente: (Pombo, 2009)

	Desinfección por Cloro	Desinfección mediante UV
Sin subproductos de la desinfección (SPD)	No	Si
Sin residuos Químicos	No	Si
No Corrosiva	No	Si
Sin riegos para la seguridad de la comunidad	No	Si
Eficaz contra <i>Cryptosporidium</i> y <i>Giardia</i>	No	Si

3.2.6 Ventajas de la desinfección por UV relativas a los costes

- Los costes operativos de la desinfección por UV vienen dados por la sustitución anual de las lámparas y el consumo eléctrico organolépticos (Begum et al., 2009).
- La luz UV elimina o reduce el peligro inmediato para la seguridad que supone el gas de cloro, sin crear nuevos costes a largo plazo asociados al uso de productos químicos, el transporte y la distribución (Vasuja & S, 2018)
- Con la desinfección por UV, se minimizan y/o eliminan los costes por respuestas a fugas, administración, gestión de riesgos y planificación de emergencias y formación de los operarios (Cataldo et al., 2017).
- Los ayuntamientos no pagan primas por las significativas ventajas para la seguridad de la desinfección por UV (Diaz,2022).

3.2.7 Dosis

La dosis de luz UV es la medida de la cantidad de luz UV que recibe una población microbiana. Se calcula multiplicando la intensidad de la luz UV por el tiempo de

exposición. La intensidad de la luz UV se mide en milivatios por centímetro cuadrado (mW/cm^2) o vatios por metro cuadrado (W/m^2) o milijulios por centímetro cuadrado (mJ/cm^2) o julios por metro cuadrado (J/m^2) y el tiempo en segundos (s) (Gonzales, 2018).

La dosis de inactivación microbiana es la cantidad de luz UV necesaria para inactivar el 99% de una población microbiana. En la mayoría de los casos, las dosis usadas para la eliminación de microorganismos en alimentos abarcan un intervalo desde los 0,2 hasta los 20 kJ/m^2 .

La distancia entre la lámpara y el sustrato, el grado de turbidez de la vía de propagación de la luz y la concentración de microorganismos en la muestra afectan la dosis que finalmente alcanza la muestra. Este tipo de tratamiento requiere que toda la superficie del objeto quede expuesta a la luz UV durante el tiempo suficiente para que cualquier microorganismo presente pueda acumular la dosis letal (Gonzales, 2018).

Ecuación 4

$$D = I * t$$

D: dosis de irradiación aplicada ($\frac{\text{kJ}}{\text{m}^2}$)

I: intensidad de irradiación bajo el área de emisión de luz UV – C ($\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$)

t: tiempo de exposición (s)

Teniendo en cuenta las consideraciones de la irradiación ultravioleta sobre diversos frutos en la industria alimentaria, se suma el uso de ADI para procesar superficies irradiantes UV, el cual genera parámetros de valor para el diseño de cámaras germicidas ya que estos métodos analizan específicamente los patrones morfológicos de los alimentos para proponer modelos eficientes sobre alimentos.

3.3 Procesamiento digital de imágenes

3.3.1 Fundamentos Lagunaridad

La lagunaridad es una magnitud fractal que permite diferenciar fractales con la misma dimensión fractal, pero que mantienen una apariencia similar, se ha utilizado en el análisis de imágenes para identificar parámetros de forma y dimensión fractal asociados al comportamiento físico de un fenómeno específico sobre superficies; con el fin de identificar una relación directa de fractales con misma apariencia. Es considerada una medida de heterogeneidad o textura y puede ser calculada basada en patrones fractales, no fractales o multirraciales (Macario, 2014).

Este concepto complementa la modelación fractal, ya que vence la incertidumbre que se tiene sobre la textura de un objeto, porque dos fractales pueden tener la misma dimensión sí siguen el mismo patrón para ser generadas, pero su apariencia es diferente al presentar huecos o lagunas en una mayor o menor concentración (Rodríguez, 2005).

La lagunaridad es una función que analiza la fluctuación de una distribución de frecuencias de masa asociado a un tamaño de escala r , y queda definida estadísticamente en términos de su contorno de la superficie donde se estima el grado de precisión.

3.3.1.1 Método de la caja deslizante o *Gliding Box*

En general el método se fundamenta en seis pasos, dada la distribución espacial del patrón (Ecuación 5). Donde una caja de tamaño r se desliza por toda la geometría y cada vez que la caja es posicionada, se hace el conteo de los puntos del patrón que caen en ella, produciendo una distribución de frecuencias de masa $q(s, r)$, que indica el número de cajas con masa s dado el tamaño de caja r . Luego, esta distribución de frecuencias $Q(s, r)$, se convierte en una distribución de probabilidad $Q(s, r)$ al dividir $Q(s, r)$ entre $N(r)$, donde $N(r)$ que es el número de cajas de tamaño r usadas para cubrir toda la geometría (Modest, 2003).

Con formato: Sin Resaltar

Con formato: Sin Resaltar

Ecuación 5

$$Z1(r) = \sum_{s=1}^{s \max} sQ(s, r)$$
$$Z2(r) = \sum_{s=1}^{s \max} s^2Q(s, r)$$

Igualmente, los siguientes pasos (Ecuación 6), comprenden: cálculo de lagunaridad Λ con respecto a una escala r como el segundo momento entre el primero al cuadrado, la función $\Lambda(r)$ se evalúa entonces para diferentes valores de r , es decir, para diferentes escalas, con un valor inicial de r que después debe irse decrementando a intervalos y puede llegar a la unidad mínima del conjunto, en este caso, el valor mínimo es un pixel y para obtener un sólo valor λ que describa el comportamiento de la lagunaridad considerando diferentes escalas, se grafica r contra $\Lambda(r)$, con o sin escala log-log. El valor de λ será igual a la recta que mejor se ajuste a los puntos de lagunaridad en la gráfica, y puede obtenerse calculando mínimos cuadrados o con la derivada presentada en la Ecuación 6.

Ecuación 6

$$\lambda = \frac{d \log(A(r))}{d \log(r)}$$

3.3.2 DBC - Diferencial Box Counting

Este método también es llamado conteo de cajas diferencial (DBC - Differential Box Counting), donde los valores dentro de la caja deslizantes $r \times r$ se verán como relieves. Así para calcular la masa $q(s, r)$, una columna de cajas $r \times r \times r$ se construye apilando u cajas para cubrir el valor mínimo dentro de la caja y v cajas para el valor máximo. La altura relativa para esa columna sería entonces $h(r) = v - u + 1$.

3.3.2.1 Promedio de los valores dentro de la caja

Para calcular $q(s, r)$, cada vez que la caja c de dimensiones $r \times r$ se desliza, se calcula el promedio de los valores dentro de ella. Por lo tanto, la masa de caja se calcula basado en la ecuación 7:

Ecuación 7

$$q(s, r) = \sum_{i=1, k=1}^r c(i, k)$$

3.3.3 Fundamentos Box Counting

Esta dimensión es de las más usadas, ya que su cálculo matemático y estimación empírica son fáciles de calcular. Su definición se remonta hacia la década de 1930 y fue conocida con diferentes nombres como entropía de Kolmogorov, dimensión de entropía, dimensión de capacidad, dimensión métrica, dimensión de información o densidad logarítmica (Macario, 2014)

Actualmente, se define de manera formal la dimensión de conteo de cajas o dimensión Box Counting. Sea F un subconjunto no vacío acotado en R^n y sea $N_\delta(F)$ el número más pequeño de conjuntos con un diámetro a lo más de tamaño δ con el que se puede cubrir F . Si las dimensiones Box Counting inferior y superior de F son iguales, entonces nos referimos al valor común como la dimensión Box Counting (Ecuación 8).

Ecuación 8

$$\dim_{\text{BF}} = \lim_{\delta \rightarrow \infty} \log N_\delta(F) - \log \delta$$

3.4 Radiación electromagnética de onda baja

3.4.1.1 Intensidad

La variable fundamental para la descripción del transporte de energía radiactiva es la intensidad específica (I_v), que describe físicamente a un haz de radiación (Lima

et al., 2018). Se define a partir del flujo de energía (E) por unidad de tiempo (t), área (A), frecuencia (v) y ángulo sólido (Ω), (Ecuación 9).

Ecuación 9

$$\frac{dE}{dA \cdot dt} = I\nu(k, \sim r, t) k \cdot n d\Omega dv,$$

Donde, n corresponde a la normal al elemento de área dA que atraviesa el haz, el cual se propaga en la dirección k . $I\nu$ es función de la posición, del tiempo, de la frecuencia y del vector de propagación (Gonzales, 2018). De esta manera, la combinación (donde k es el vector de propagación de intensidad y ν es frecuencia del momento radiante) corresponde con el vector (Ecuación 10) de propagación que se relaciona directamente con el ángulo sólido (Ecuaciones 10 y 12).

Ecuación 10

$$k = (2\pi\nu/c)k$$

Ecuación 11

$$k = z \cos \theta + (x \cos \varphi + y \sin \varphi) \sin \theta$$

Ecuación 12

$$d\Omega = \sin \theta d\theta d\varphi$$

De esta manera, $I\nu$ contiene información de la distribución espacial, angular y espectral del campo de radiación como se observa en la figura 7.

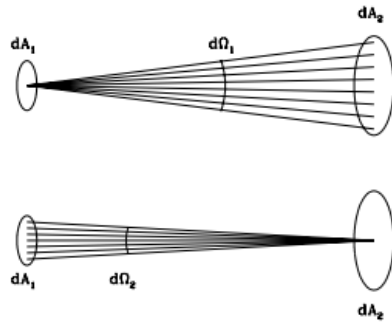


Figura 7. Coordenadas cartesianas de la transferencia radiactiva sobre un sólidos en un plano cartesianos de tres ejes. Fuente: (Clocchiatti & Catelan, 2018)

3.4.1.2 Ley de la inversa del cuadrado

La ley de la inversa del cuadrado para la intensidad de una onda sonora lumínica o de otro tipo puede ser deducida rigurosamente a partir de la ecuación 14 de onda y la definición de intensidad (Ecuación 14). La relación que tiene con el modelo de la dinámica de transferencia de radiación UV, es que al aumentar la distancia entre el emisor y receptor la intensidad pierde magnitud en el vector.

Ecuación 13

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \vartheta}{\partial r} \right) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial t^2} = 0$$

$$\vartheta(r) = \frac{A_0}{r} \sin(\omega t + kr + \alpha)$$

Ecuación 14

$$I = \frac{A_0^2}{r^2}$$

En este sentido, cualquier fuente puntual que extiende su influencia en todas las direcciones por igual, sin límite de alcance, se regirá por la ley del inverso del

cuadrado, lo que proviene de consideraciones estrictamente geométricas (Ponomarev et al., 2016). La intensidad de la influencia en cualquier radio dado r , es la intensidad de la fuente en el origen, dividida por el área de la esfera. Siendo estrictamente geométrica en su origen, la ley del inverso del cuadrado se aplica a diversos fenómenos como se muestra en la figura 8, que incluyen fuerzas de gravitación, campo eléctrico y luz (González et al., 2015).

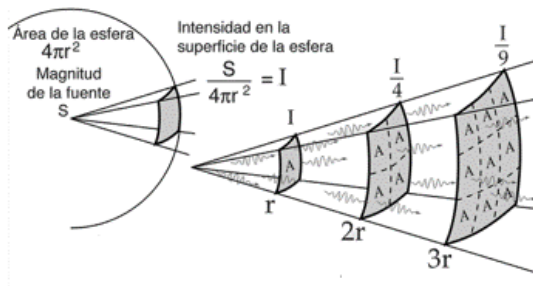


Figura 8. Transferencia de radiación basado en la ley inversa al cuadrado para una fuente con geometría esférica, Fuente: (Gonzales, 2018)

Teniendo en cuenta que la distribución de la radiación para un medio esférico se basa en el área de la geometría de la fuente de emisión, para una tuvo UV, se debe emplear una ecuación semejante a la geometría cilíndrica (Ecuaciones 15 - 18).

Ecuación 15

$$Id = \frac{dP}{dA_{cilindro}}, \text{ potencia de la lamapra UV según fabricante.}$$

Ecuación 16

$$A = 2 * \pi * r * L + 2 * \pi * r^2$$

Ecuación 17

$$V = \pi * r^2 * h$$

Ecuación 18

$$Id = \frac{dP}{(2 * \pi * r * L + 2 * \pi * r^2)}$$

3.4.1.3 Transferencia radiactiva

La ecuación 16 describe el fenómeno de transferencia de radiación de un medio radiante sobre un objeto o masa específica, el cual está basado en la teoría del transporte y balance de masa, que considera la energía ingresada, saliente, emitida y absorbida en un elemento de volumen infinitesimal dentro de un medio participante, donde ocurren los fenómenos de emisión, absorción y dispersión. Esto es descrito matemáticamente por la ecuación de Boltzmann, usada en la teoría cinética de los gases (Gonzales, 2018).

Ecuación 19

$$\frac{1}{v} \left[\frac{\partial I(r, \lambda, \Omega, t)}{\partial t} \right] + \Omega \cdot \nabla I(r, \lambda, \Omega, t) + \sigma^t(r, \lambda) I(r, \lambda, \Omega, t) \\ \int_{r^2} \int_0^\infty \sigma^s(r, \lambda' \rightarrow \lambda, \Omega' \rightarrow \Omega) I(r, \lambda, \Omega, t) d\lambda d\Omega + S(r, \lambda, \Omega, t)$$

Donde:

$I(r, \lambda, \Omega, t)$ Es la intensidad de la radiación en la posición r , en la dirección unitaria Ω , de longitud de onda λ , en el tiempo t . Con unidades $[Wm^{-2}sr^{-1} \mu m]$.

$\sigma^a(r, \lambda)$ Es el coeficiente de absorción en la posición r , para longitud de onda λ . Con unidad $[m^{-1}]$.

$\sigma^s(r, \lambda)$ Es el coeficiente de dispersión en la posición r , para longitud de onda λ . Con unidad $[m^{-1}]$.

$\sigma^t(r, \lambda) = \sigma^a(r, \lambda) + \sigma^s(r, \lambda)$, es el coeficiente de extinción total en la posición r , para longitud de onda λ . Con unidad $[m^{-1}]$.

$S(r, \lambda, \Omega, t)$ Es la fuente distribuida en el interior del medio en el punto r , con longitud de onda λ , en la dirección unitaria Ω , en el tiempo t . Con unidades [$\text{Wm}^{-3} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}$].

r Es la variable espacial, con coordenadas (x, y, z) . Con unidad [m].

Ω Es la dirección angular del movimiento de la radiación.

Ω' Es la dirección angular de la radiación dispersada.

t Es el tiempo. Con unidad [s].

λ Es la longitud de onda de la radiación. Con unidad [μm].

V es la rapidez característica de la radiación en el medio. Con unidades [ms^{-1}].

$d\Omega$ Elemento de ángulo sólido asociado a la dirección angular Ω . Con unidad [sr].

En transferencia radiactiva para aplicaciones en medios tridimensionales es usual denotar el dominio angular como 4π . Considerando un sistema sin dependencia espectral, la dependencia en la energía (λ) de cada función desaparece, lo que lleva a la conocida formulación de la ecuación de transporte de una energía (Ecuación 20).

Ecuación 20

$$\Omega \cdot \nabla I(r, \Omega) + \sigma^t(r, \lambda) I(r, \Omega) = \int_{4\pi} \sigma^s(r, \Omega' \rightarrow \Omega) I(r, \Omega') d\Omega + S(r, \Omega)$$

Donde, $I(r, \Omega)$, es la intensidad de la radiación monocromática o flujo angular de radiación a una sola energía en el punto de las coordenadas discretas

3.4.1.4 Transferencia radiactiva por el método de ordenadas discretas

El método de ordenadas discretas está basado en una representación discreta de la variación angular de la intensidad irradiada (Koutchma, 2009). Así, una solución para el problema de transporte es construida resolviendo la ecuación de transporte energético sobre un conjunto de direcciones discretas extendidas sobre el alcance total del ángulo sólido, 4π , y el método de diferencias finitas en la parte espacial como se muestra en la figura 9. Donde, el método de ordenadas discretas consiste, por tanto, en la discretización de la variable angular, y el término integral (in-scattering) sobre el ángulo sólido es aproximado por un conjunto de direcciones ordenadas, denominadas cuadraturas numéricas (Millán et al., 2015).

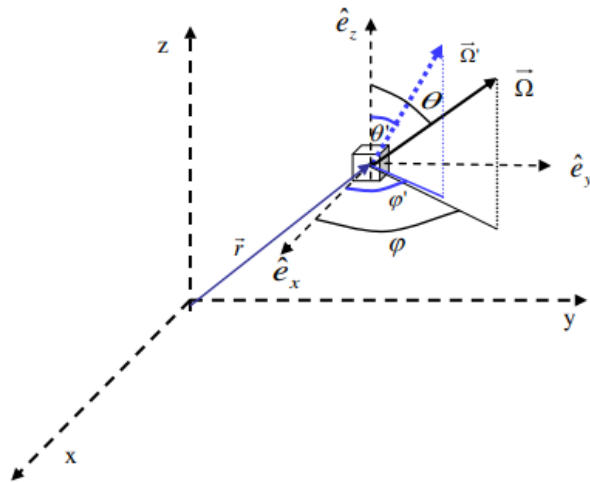


Figura 9. Transferencia de radiación basado en la ley inversa al cuadrado para una fuente con geometría esférica, Fuente: (Gonzales, 2018)

3.4.1.5 Leyes de absorción

Cuando se aísla la longitud de un haz de luz, mediante un monocromador el haz de luz resultante se denomina radiación monocromática, esta con un potencia P_0 y se irradia sobre un muestra de espeso b , esta absorbe una fracción de luz, como resultado la luz resultante que emerja de la muestra tendrá un potencia de P , de manera que $P \leq P_0$ (Guerrero-Beltrán & Barbosa-Cánovas, 2004). Así, la

transmitancia (T) se define como la fracción de radiación incidente que sale de la muestra (ecuación 21), que como se puede deducir puede tener valores entre cero y uno. Este parámetro describe la transparencia del entorno; mientras que la absorción se define como la cantidad de energía en potencia que una muestra tiene la capacidad de absorber de una luz monocromática (ecuación 22).

Ecuación 21

$$T = \frac{P}{P_0}$$

Ecuación 22

$$A = \log\left(\frac{P_0}{P}\right) - \text{Log } T$$

3.4.1.6 Ley de Bouguer - Lambert

En 1729 Bouguer formulo (Ecuación 23) que describe la relación que existe entre la absorción de la radiación y la longitud de trayectoria a través del medio absorbente. Para establecer la relación se debe tener en cuenta que, sobre un medio absorbente homogénea, como una solución química, se puede dividir en varias capas una encima de la otra del mismo espesor, si se dirige un haz de radiación monocromática a través de este medio, se encontrará que cada una de las capas absorbe una fracción igual de radiación o que cada capa disminuye el poder de radiación del haz en una fracción idéntica (García, 2016). Esto se puede representar mediante una ecuación que indica que la disminución de la energía radiante por unidad de espesor del medio absorbente es proporcional a la energía radiante:

Ecuación 23

$$-\frac{dP}{db} = k_1 P$$

Esta ecuación puede reescribirse para poder ser integrada entre los límites P_0 y P , y 0 y b (Ecuación 24).

Ecuación 24

$$-\frac{dP}{P} = k_1 db \quad - \int_{P_0}^P \frac{dP}{P} = k_1 \int_0^b P$$

En la ecuación 25, se describe que la energía radiante transmitida disminuye en forma exponencial al aumentar en forma aritmética el espesor del medio absorbente; esto es si hacemos que el espesor del medio se incremente en forma infinita, la energía radiante emitida se aproximará al valor de cero.

Ecuación 25

$$\ln \frac{P_0}{P} = k_1 b \quad \log \frac{P_0}{P} = k_2 b$$

3.4.1.7 **Ley de Beer**

En 1859 Beer formuló la relación directamente proporcional entre la especie absorbente y el grado de absorción. La ley Beer describe, de forma análoga a la de Bouguer-Lambert una disminución exponencial de la energía radiante transmitida con un incremento aritmético en la concentración (Ecuación 26).

Ecuación 26

$$\log \frac{P_0}{P} = k_4 C$$

3.4.1.8 **Ley de bouguer - lambert-beer**

Las leyes de Bouguer-Lambert y de Beer se pueden combinar para obtener una ecuación conveniente para su aplicación en análisis químico. Si se estudia el efecto del cambio de concentración en la absorción, podemos notar que la longitud de la trayectoria a través de la solución se mantendrá constante, pero que los resultados dependerán de este valor constante, es decir $k_4 = f(b)$; en forma similar, en la ley de Bouguer-Lambert $k_2 = f(C)$ (Ecuación 27).

Ecuación 27

$$\log \frac{P_0}{P} = f(C)b \qquad \text{Log} \frac{P_0}{P} = f(b)C$$

Dado que las dos leyes deben aplicarse en forma simultánea en cualquier punto (Ecuación 28).

Ecuación 28

$$f(C)b = f(b)C \qquad \frac{f(C)}{C} = \frac{f(b)}{b}$$

Si la condición para que las dos funciones o variables independientes puedan ser iguales es que ambas sean iguales a una constante K. Debido a que se había definido que $A = \log (P_0 / P)$ se obtiene la ecuación conocida como la ley de Bouguer-Lambert-Beer (Ecuación 29).

Ecuación 29

$$A = K b C$$

Donde, b es aceptado para representar la longitud de paso óptico, es decir la longitud de la trayectoria del haz de la radiación a través del medio absorbente, generalmente es expresado en unidades de centímetros, C representa la concentración del medio absorbente empleándose generalmente mol/litro o bien g/litro; y K se conoce como constante de absortividad, cuando experimentalmente se emplean unidades de concentración de mol/litro, K es cambiada por la etiqueta ϵ , y recibe el nombre de coeficiente de absortividad molar (litro/mol cm). En cambio,

si las unidades de concentración son g/litro la etiqueta de K se cambiará por a y se le conoce como coeficiente de absortividad específico (litro/g cm).

3.5 Gamma -Poisson

La distribución de Poisson es una distribución de probabilidad discreta que, dada la frecuencia media de ocurrencia λ , representa la probabilidad de que ocurra un número específico de eventos en un cierto intervalo de tiempo o región (Muñoz, 2014).

Los valores de la esperanza (o media) y de la varianza para la distribución de Poisson son respectivamente $E(X) = \lambda$ y $V(X) = \lambda$.

Por otro lado, la distribución gamma o la suma de la distribución exponencial junto con la distribución de *Erlang* y la distribución de *chi-cuadrado*. Es una distribución de probabilidad continua adecuada para modelar el comportamiento de variables aleatorias con asimetría positiva y/o experimentos con el tiempo.

En su expresión se encuentran dos parámetros, siempre positivos, α y β de los que depende su forma y alcance por la derecha, y también la función *gamma* $\Gamma(\alpha)$, responsable de la convergencia de la distribución.

Los valores de la esperanza $E(X)$ y varianza $V(X)$, se determinan mediante:

$$E(X) = \alpha \beta$$

$$V(X) = \alpha \beta^2$$

Sin embargo, la distribución *Gamma-Poisson* está dada por la distribución *Gama* con (α', β') de la siguiente forma:

$$\alpha' = \alpha + \sum_{i=1}^n x_i$$

$$\beta' = \beta + n$$

Donde $\sum_i^n x_i$ es la suma de n realizaciones de la distribución Poisson que utilizamos para actualizar nuestra conjetura.

3.6 Modelos matemáticos no lineales para curvas de inactivación

3.6.1.1 Modelo bifásico lineal

El modelo bifásico lineal busca relacionar dos variables de incidencia sobre el fenómeno de estudio, los cuales son, sensibilidad al tratamiento y resistencia al tratamiento (Ecuación 30). En el uso microbiológico la concentración de células en el tiempo t se representa como N(t) (log UFC/ml), mientras que N₀ (log UFC/ml) es la concentración inicial de células. El parámetro f define la fracción de la población inicial que se considera como la población mayor, mientras que (1 - f) representa la fracción de la población inicial que se considera como la subpoblación menor y más resistente al calor que la subpoblación mayor. Los parámetros k₁ y k₂ representan el coeficiente de velocidad de inactivación para cada subpoblación, respectivamente (Cerf, 1977).

$$\log \frac{N(t)}{N_0} = \text{Log} (f e^{-k_1 t} + (1 - f) e^{-k_2 t})$$

Ecuación 30

$$\log \frac{N(t)}{N_0} = \{ \text{Log} (f e^{-k_1 t} + (1 - f) e^{-k_2 t}) \} \rightarrow t \geq t_{lag}; \log \frac{N(t)}{N_0} = 0 \rightarrow t \leq t_{lag}$$

Ecuación 31

3.6.1.2 Modelo Weibull inhibición

Se basa en el análisis estadístico y ayuda a describir la distribución de tiempos de inactivación en procesos donde se busca eliminar microorganismos (bacterias,

hongos, virus, etc.). Funciona particularmente bien para modelar procesos de inactivación no lineales.

Ecuación 32

$$\text{Log } N_t = \text{Log } N_0 - (t/\alpha)^\beta$$

En donde se mide la probabilidad de que un microorganismo se inactive en un tiempo determinado bajo condiciones específicas del proceso de inactivación (por ejemplo, temperatura, presión, concentración de un agente esterilizante). El uso de este modelo a diferencia de modelos más simples (como el de primer orden), el modelo de Weibull tiene en cuenta la variabilidad natural en la resistencia de los microorganismos al tratamiento. Algunos microorganismos pueden ser más resistentes que otros y por lo tanto tomar más tiempo en inactivarse. El modelo de Weibull captura esta heterogeneidad en la población microbiana.

Alpha (α): Representa el tiempo característico de inactivación. Se relaciona con el tiempo necesario para inactivar a una fracción específica de la población microbiana (por ejemplo, el 63%). Un valor bajo de alpha indica una inactivación rápida, mientras que un valor alto indica una inactivación más lenta.

3.6.1.3 Modelo de Whiting–Buchanan

Es un modelo logístico, de cuatro parámetros, considera el efecto significativo de hombros y colas en las curvas de supervivencia, tal como se describe en la ecuación 32. El parámetro f es la fracción de la población inicial considerada población mayor y, $(1 - f)$ es la fracción de la población inicial considerada como subpoblación menor y más resistente al calor que la subpoblación mayor. Los parámetros b_1 y b_2 son la tasa de inactivación para las subpoblaciones respectivamente, t_{lag} es la duración de la fase latencia y toma valor de 0 en casos que la curva no presente fase lag (Buchanan et al., 1994; Whiting, 1993).

Beta (β): Representa el factor forma del modelo. Indica la forma de la curva de supervivencia microbiana. Un valor de beta menor a 1 indica una "cola larga" en la

curva, lo que significa que algunos microorganismos son muy resistentes y toman mucho tiempo para inactivarse.

3.6.1.4 Dosis inactivación microorganismos

Las siguientes tablas describen la recopilación de la literatura en materia de inhibición de microorganismos bajo diferentes dosis de radiación UV, lo que nos ayuda a estimar cuales son las dosis mínimas requeridas para la eliminación de la mayor concentración de microorganismos que en la practica puede contener el residuo de cascara de café.

Tabla 4. Exposición ultravioleta de 254 nm para una reducción de la carga microbiana de 4 log para la desinfección del agua potable Fuente: (Hoyer, 1998; Sastry et al., 2000).

Micorganismo	Exposición requerida con reactivación (J/m ²)	Exposición requerida sin reactivación (J/m ²)
<i>Escherichia coli</i> ATCC23958	50	200
<i>Vibrio cholerae</i> wild isolate	50	210
<i>Citrobacter freundii</i>	80	250
<i>Escherichia roll</i> ATCC 11229	100	280
<i>Enterobacter cloacae</i>	100	330
<i>Yersinia enterocolitica</i>	100	320
<i>Klebsiella pneumonias</i>	110	310
<i>Pseudomooos aeruginosa</i>	110	190
<i>Salmonella Typhimurium</i>	130	250
<i>Serratia marcescens</i>	130	300
<i>Salmonella Typhi</i>	140	190
<i>Enterocolitica faecium</i>	170	200
<i>Mycobacterium smegmatis</i>	200	270

Tabla 5. Dosificación ligera en frutas, verduras sometidas a diferentes propósitos hormonales. Fuente: (Mditshwa et al., 2017)

Fruta	Micorganismo	Dosis kJ/m ²	Fuente
Fresas	<i>Botrytis cinerea</i> (control decay)	0,25-1,0	Baka et al. (1999)
Tomates	<i>Altemaria alternata</i> , <i>BotrytJs clnerea</i> , <i>Botrytis cinerea</i>	1,3-40,0	Liu et al. (1993)

Limones	<i>Rhizopus stolonifer</i> <i>Penicilium digitatum</i> (<i>phytoalexins prod.</i>)	5-15,0	Ben-Yehoshua et al. (1992)
Duraznos y manzanas	<i>Reduction of not and</i> <i>delayed ripening</i>	0,84-40,0	Lu et al. (1991)
Mandarinas	<i>Penicilium digitatum</i>	1	Stevens et al. (1997.1998)
Duraznos	<i>Monilinia fructicola</i>	8	Stevens et al. (1997)
Tomates y papas	<i>Rhizopus stolonifer</i>	4	Stevens et al. (1997)
Toronjas (Estrella Rubí)	<i>Production of phytoalexins</i>	001	O'hallewin et al. (2000)

4. Objetivos

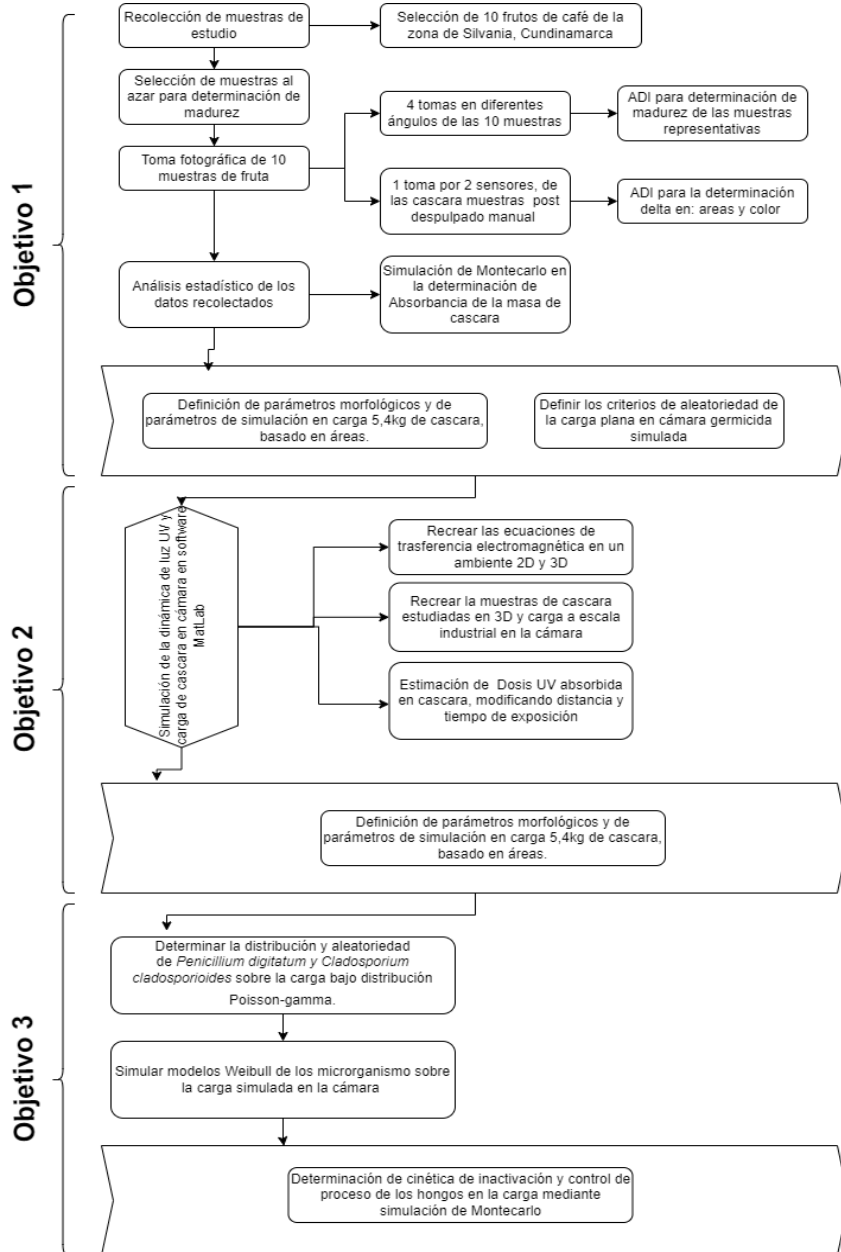
4.1 Objetivo General

Modelar la dosis de radiación UV en una cámara germicida para desinfección de la cáscara de café.

4.2 Objetivos específicos

1. Determinar los parámetros morfológicos de la cáscara de café.
2. Modelar la dosis de radiación UV en una cámara germicida en función de la distancia entre la fuente de luz y geometría de la cáscara de café.
3. Proponer una cinética simulada de inactivación por radiación UV sobre hongos modelo en cáscara de café a partir de la dosis de radiación absorbida, para la estimación de los tiempos de desinfección en cámara germicida.

5. Metodología



5.1 Adquisición de datos para la simulación

Para determinar los parámetros morfológicos de la cáscara de café, se realizó un experimento en dos etapas. En la primera etapa, se estudió la variación morfoestructural y colorimetría de la cáscara de café bajo la influencia de la radiación UV-C. En la segunda etapa, se estimaron las dosis absorbidas por la cáscara de café mediante simulación de Montecarlo usando el software MatLab R2019b (The MathWorks, Inc., USA, 2019).

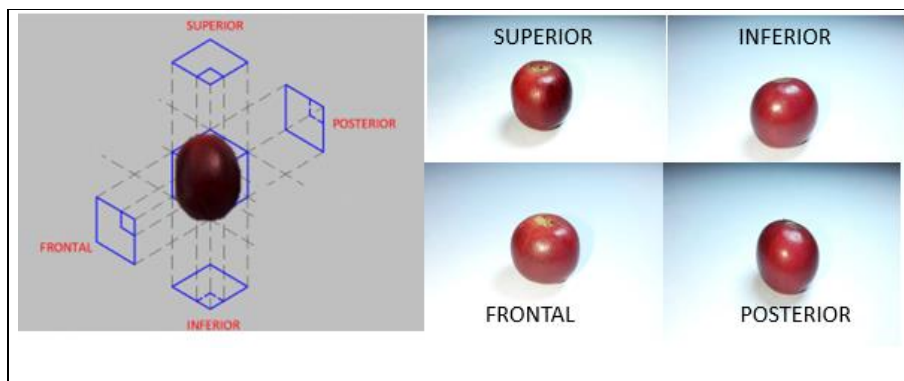
Se cosecharon granos de la especie *Coffea Arábica* genotipo I cultivada en la zona andina de Sylvania, Cundinamarca. Los granos se clasificaron visualmente basados en los criterios DDA (Estimación color por días de maduración). Se estimaron muestras entre 30 a 35 semanas después de la floración que se ubican en los grupos 224, 231, 238. Los datos de color (RGB), geometría (alto, ancho, largo), lagunaridad, dimensión fractal fueron capturados mediante el análisis de imágenes.

5.1.1 Diseño experimental

Se determinaron los parámetros morfológicos de las cáscaras de café para definir la dosis de radiación UV absorbida. Los datos se analizaron mediante análisis digital de imágenes (ADI) usando el software IMAGE J (Wayne Rasband-National Institutes of Health (NIH), USA, 2019). Las variables de medición fueron colorimetría, lagunaridad del fruto recién recolectado y el área superficial de las cáscaras después de ser despulpadas.

Se tomaron 30 muestras de frutos de café elegidos de forma aleatoria de una población de 240 obtenidas después del proceso de recolección. Se tomaron registros fotográficos de los frutos previamente a la operación de despulpado.

En primera instancia se realizó una clasificación de frutos mediante inspección visual bajo los criterios DDA (Estimación color por días de maduración) de color, y se realizó una limpieza del fruto de forma manual en tanque de agua y secado del medio ambiente, para eliminar partículas de suciedad sobre la película del exocarpio del fruto. Con el sensor macro de los dispositivos móviles se realizó toma fotográfica desde 4 ángulos diferentes del fruto (cara superior, inferior, frontal y posterior como se muestra en la figura 10).



*Figura 10. Muestra de caras analizadas para una muestra de fruto de café.
Fuente: Autor. Explicación de las tomas fotográficas hechas en cada fruto de estudio*

Las fotografías fueron analizadas mediante el software Image J para medir el modal aritmético de distribución de los píxeles RGB y las coordenadas cromáticas que componen cada imagen con los dos sensores, para determinar con exactitud la clasificación DDA del fruto de estudio.

Después de realizar el primer registro fotográfico se procedió a despulpar el fruto por instrumentación de molienda artesanal, en donde se les extrajo la semilla y se seleccionaron 30 cáscaras de forma aleatoria por cada grado de maduración como muestra para el análisis. En el proceso de despulpado bajo método húmedo el

mesocarpio pierde masa; dando como resultado principalmente cáscara de café con remanentes de la pulpa y mucilago.

se posicionaron las cáscaras de los frutos recolectado de café, bajo la influencia de luz ultravioleta tipo C de la lampara Phillips. Los periodos de seguimiento y registro fotográfico para las cáscaras fue de 5 minutos durante un rango de tiempo de 30 minutos y posterior a los primeros 30 minutos se realizó un seguimiento cada hora durante 8 horas, para determinar en el primer rango de tiempo cambios inmediatos que pudo ejercer la radiación sobre las cáscara y a largo plazo evaluar si se generaba manchas o lesiones en las superficies.



Figura 11. Cáscaras de café distribuidas en pliegos de muestras para inicio de experimento, tiempo 0. Fuente: Autor.

En el tiempo cero, se realizó una toma fotográfica de referencia y a través de ADI (análisis digital de imagen) se determinaron los cambios en forma, color, superficie y lagunaridad de las superficies en los periodos de seguimiento. Se realizó el montaje de un control negativo sin exposición a luz UV. Las configuraciones de análisis de imágenes fueron:

- Segmentación de imagen.
- Conversiones grises, boolean, threshold, suavizado.
- Binarización de imagen.

- Escalado de imagen.
- Extracción de componentes RGB.
- Lagunaridad.
- Dimensión fractal.
- Cálculos de longitud, largo y ancho.
- Texturizado basado en lagunaridad
- Modelado 3D basado de texturizado

5.1.2 Clasificación de madurez


El primer análisis realizado fue la estimación de los valores por sus componentes RGB de los frutos y determinar a través de la tabla 6 cromatográfica la madurez del fruto.


Tabla 6. Conversiones de parámetros $L^* a^* b^*$ a RGB de los datos de comparación y clasificación de granos de café. Fuente: Autor.

224					
		Modelo	DDA 238	DDA 231	DDA 224
231		R	98	116	120
		G	46	54	56
238		B	59	67	68

En la tabla 6 se muestra el cálculo de conversión de la escala cromática $L^* a^* b^*$ para los granos identificados en el estudio como DDA 224, 231 y 238 que corresponde a la clasificación de colores de granos con un estado de madurez óptimo y comúnmente utilizado en la industria cafetera.

Tabla 7. Análisis estadístico de color para 30 muestras de fruto de café en 3 estados diferentes de madurez.

Sensor	Clasificación	Valor 8 bit	Moda	Color predominante RGB
Replica 1	224	R	163	
		G	87	
	B	45		
	231	R	124	

		G	48	
		B	53	
		R	98	
	238	G	53	
		B	67	
		R	148	
	224	G	67	
		B	43	
		R	112	
Replica 2	231	G	67	
		B	54	
		R	94	
	238	G	64	
		B	68	

5.1.2.1 *Espesor del fruto*

Se midió en milímetros a lo largo del tabique del fruto binarizando la fotografía de muestras y estableciendo la escala milimétrica. El valor del descriptor fue el modal de las muestras. Los detalles de la caracterización cuantitativa del fruto se presentan en la figura 12. Caracterización del fruto: (A) largo, (B) ancho y (C) espesor.

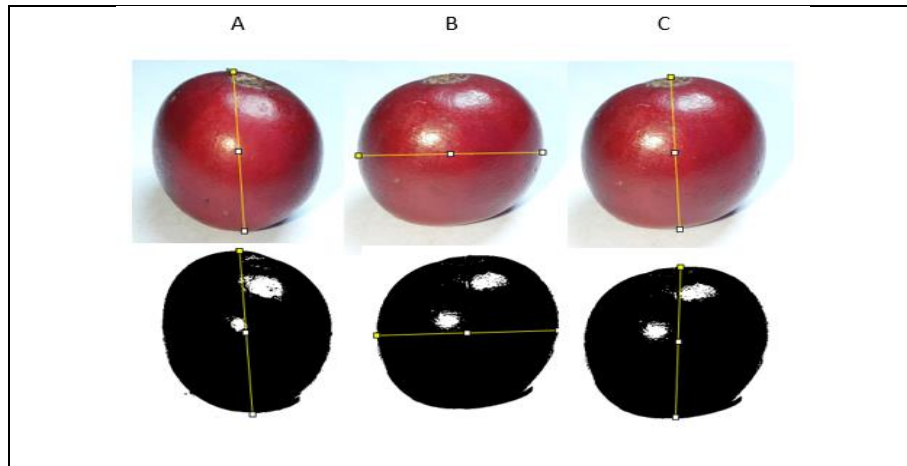


Figura 12. Mediación de largo, ancho y profundidad de granos de café mediante ADI.

5.1.2.2 **Forma del fruto**

Para describir la forma del fruto se utilizaron figuras establecidas clasificadas en códigos del 1-5, donde (1) redondeada, (2) obovada, (3) oval, (4) elíptica, (5) oblonga (IPGRI 1996). La forma del fruto por planta se determinó con base a la moda del total de los 15 frutos (total de las tres muestras) caracterizados (IPGRI 1996).

5.1.3 **Dimensión fractal**

Se realizó la estimación de la superficie de la masa de café mediante la metodología Box Counting para determinar la dimensión fractal para lograr estimar la distribución ordinaria de las cascará en el modelo simulado que se propondrá en el objetivo 2.

Se realizó un sobre escalado de las imágenes con una dimensión de matriz de 200 x 200 y para establecer el parámetro de simulación, porque la dimensión de la fotografía es muy grande para el análisis y con esa cantidad de datos es suficientes para determinar dimensión fractal. El método de Box Counting, consiste en realizar un

conteo de cajas para determinar mediante algoritmos cuantas cajas y de que tamaño representan de la manera más precisa el contorno de la superficie. El resultado del método Box Counting se expresa en a la siguiente tabla.

Tabla 8. Resumen de conteo de cajas para cada muestra de cáscara de café.

	C1	C2	C3	C4	C6	C8	C12	C16	C32	C64	Df
Cáscara 1	16076	4114	1878	1076	498	290	140	81	25	10	1.802
Cáscara 2	13850	3533	1608	924	425	250	120	72	23	6	1.846
Cáscara 3	18044	4606	2099	1201	555	327	157	90	30	8	1.845
Cáscara 4	12889	3301	1501	861	399	231	112	67	20	6	1.843
Cáscara 5	12397	3189	1454	838	394	229	108	69	21	6	1.826
Cáscara 6	14633	3752	1706	988	459	269	128	78	25	9	1.791
Cáscara 7	12807	3300	1508	874	410	246	119	71	22	8	1.786
Cáscara 8	10742	2760	1262	728	331	199	93	58	19	7	1.779
Cáscara 9	13253	3411	1561	901	419	248	118	72	21	8	1.801
Max	18044	4606	2099	1201	555	327	157	90	30	10	
Min	10742	2760	1262	728	331	199	93	58	19	6	

Df promedio: 1813.22

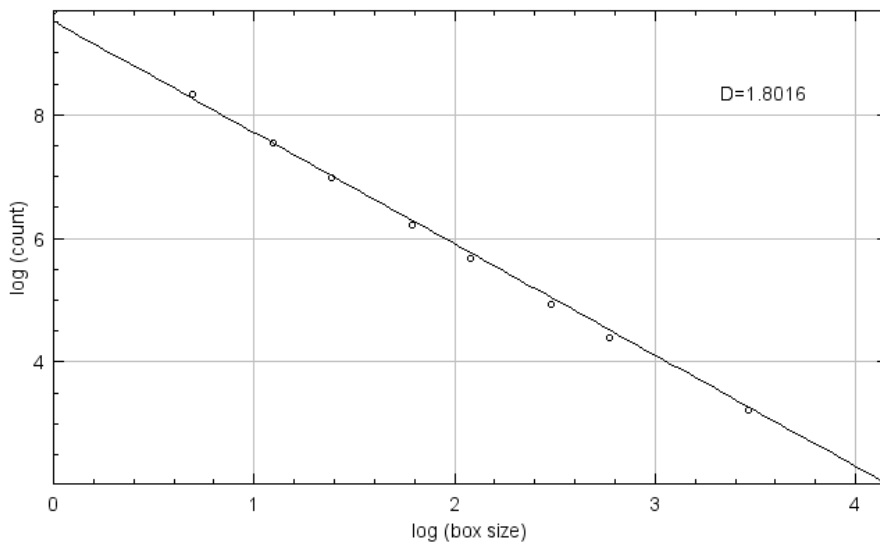


Figura 13. Dimensión fractal de cáscaras de café (ImageJ). Grafica de conteo cajas vs el tamaño de las mismas para la determinación de la dimensión fractal de las cascaras de estudio

$$Df \text{ promedio} = 1.813$$

Debido al re escalado de las fotografías a un tamaño menos, la relación que tiene es de 0.0249 mm / px, por lo tanto, en conteo de cajas con un tamaño de 1, teniendo en cuenta que Box Counting para una fotografía está asociado a el tamaño del formato de la muestra en este caso de 200x200 equivale a una resolución de 40.000 cajas. El beneficio de tener de haber desarrollado un algoritmo de binarización radica en que la muestra fotográfica de la cáscara de café representa el espacio exacto de la superficie sin tener en cuenta las sombras, de haber utilizado un método Box Counting para imágenes bajo formato de 8 bit, este posiblemente hubiese determinado que algunas sombras corresponden a ser parte del área superficial de la cáscara del fruto.

Para un tamaño de caja de 1x1 el valor de conteo fue de 16.067 caja para la cáscara 1, teniendo en cuenta la equivalencia de pixel por mm el área superficial, corresponde a 400.0683mm², en comparación con los datos estadísticos superficiales mediante métodos tradicionales de tratamiento de imágenes el valor de superficial para la cáscara 1 es de 444.731 mm², los valores difieren debido a que el re escalado de la imagen reduce el valor de pixeles y así mismo disminuye la resolución de datos obtenidos, por lo tanto se pierde información, el índice de perdida se ajustó a 11.1% basado en el análisis estadístico de las superficies aproximadas por dimensión fractal.

5.1.4 Textura basada en lagunaridad

La textura se terminó mediante lagunaridad con el objetivo de recrear la figura de las muestras en 3D sobre el modelo de simulación, para abarcar volumen aparente en la cámara germicida, con el objetivo de tener una distribución en textura que se ajuste al experimento realizado. Se ejecuto el algoritmo de lagunaridad que busca correlacionar la textura haciendo una aproximación de altura de superficie con la

diferencia de valores en 3 diferentes ángulos, los cuales corresponden a las tomas fotográficas de 30° de inclinación. Para ello se ajustó una constante de arreglo dimensional que representa el rango de valor entre 0 y 255 respecto a las sombras y reflejos de las fotografías. Esta constante se determinó en el análisis ADI y corresponde a la desviación de la media aritmética de error aparente en la medición de las muestras en valores de 8 bit.



Figura 14. Tratamiento de imágenes aplicando lagunaridad para parametrizar profundidad de cáscara.

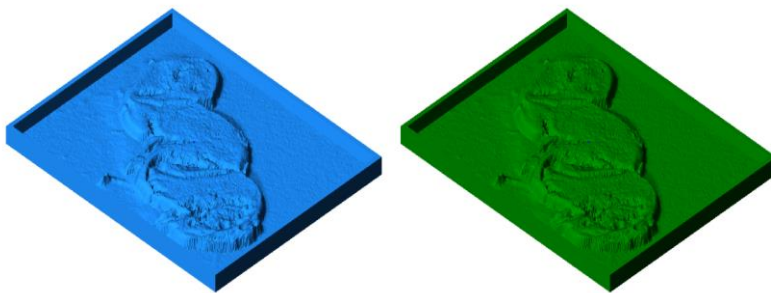


Figura 15. Modelado 3d mediante algoritmo de lagunaridad Matlab y Fluid 3d.

5.1.5 Cálculo de áreas

El cálculo del área superficial para cada muestra durante la exposición de radiación UV se realizó con la ecuación 33 y 34, la sumatoria de los pixeles binarizados después de pasar por el análisis ADI resultante, multiplicado por la escala de cada muestra da como resultado un área estimada del modelo.

Ecuación 33
$$A = \iint_I b(x,y) dx dy$$

$$x = \iint_I b(x,y) dx dy = \iint_I x b(x,y) dx dy,$$

Ecuación 34
$$y = \iint_I b(x,y) dx dy = \iint_I y b(x,y) dx dy,$$

Área estimada Cambio del diferencial de pixeles x, y contenidos en el objeto

$$A = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m b_{ij}, \quad i = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m i b_{ij}, \quad j = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m j b_{ij}$$

5.1.6 Simulación de la absorbancia de cáscara de café mediante Monte Carlo

Cuando un rayo de luz de una determinada longitud de onda de intensidad I_0 incide perpendicularmente sobre una disolución de un compuesto químico que absorbe luz o cromóforo, el compuesto absorberá una parte de la radiación incidente (I_a) y dejará pasar el resto (I_t), de forma que se cumple: $I_0 = I_a + I_t$

La transmitancia (T) de una sustancia en solución es la relación entre la cantidad de luz transmitida que llega al detector una vez que ha atravesado la muestra, I_t , y la cantidad de luz que incidió sobre ella, I_0 , y se representa normalmente en tanto por

ciento: $\% T = I_t/I_o \times 100$. La relación entre $\%T$ y la concentración no es lineal, pero asume una relación logarítmica inversa.

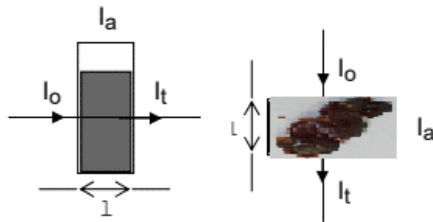


Figura 16. Descripción de absorbanza sobre cáscara de café.

La absorbanza (A) es un concepto más relacionado con la muestra puesto que nos indica la cantidad de luz absorbida por la misma, y se define como el logaritmo de $1/T$, en consecuencia: $A = \log 1/T = -\log T = -\log I_t/I_o$. Cuando la intensidad incidente y transmitida son iguales ($I_o = I_t$), la transmitancia es del 100% e indica que la muestra es capaz de absorber toda la energía a una determinada longitud de onda, y entonces $A = \log (1)$.

Se tuvo en cuenta la ecuación simplificada que expresa la intensidad de radiación en relación con la distribución de inversa al cuadrado que estará presente en el interior de la cámara para una masa estimada de 5.4 kg de cáscara de café, sin embargo, se adopta las propiedades de la experimentación con una de las cáscaras de café, para tener menor incertidumbre en el momento de HACER la simulación que dará a conocer el valor de la absorbanza de la superficie de cáscara de café.

Ecuación 35
$$Abs = -\log \left(\frac{A^2}{r^2} * \frac{d}{1} \right) - \log \frac{A t}{E} * (X/X_o)$$

$$AbsMol = a . b . c \Rightarrow Abs = \epsilon . c . \ell$$

$$AbsMol = \text{absorbancia a una longitud de onda } \lambda$$

$$a = \text{absortividad}, w = \text{coeficiente de extincion, a esa } \lambda$$

$b = \ell = \text{paso optico o espesor de la muestra}$

$c = \text{concentracion del compuesto que absorbe}$

$c = \text{concentracion molar} = \left(\frac{\text{moles}}{\text{volumen}}\right)$

5.1.7 Modelado APM la Dosis de radiación UV sobre cáscara de café

. Con el objetivo de estimar la dinámica de radiación UV-C y la dosis absorbida por la masa de cáscara de café en una cámara germicida.

Se realizaron múltiples corridas de los modelos para la radiación bidimensional y tridimensional, donde se buscó, replicar la dosis absorbida y estudio de Dosis recibida en una cámara germicida con variación de distancia del foco.

Con base en lo anterior y según literatura reportada la cáscara de café compone con cerca del 62.7% la producción, esto indica que la cantidad de cáscara de café a secar es aproximadamente de 627 ± 188.2 Kg. Sin embargo, uno de los parámetros de alta relevancia es que si el modelo es basado en un proceso escalado se escoge una cámara germicida en la industria y se establece la cantidad de masa que puede procesar.

Según los antecedentes estudiados sobre cámaras de radiación ultravioleta el promedio de ellos tiene unas dimensiones de 1.3 m^2 con una altura de 0.80 m , sin embargo, cuentan con dos o más focos UV, con diferentes longitudes de onda con la finalidad de atacar diferentes tejidos y estructuras celulares de microorganismos. Además, la mayoría cuenta con una doble plaza o bloque lo que significa que la incidencia de rayos se realiza en un volumen medio del propuesto, Por lo tanto, las dimensiones de frontera para la simulación serán

$$VCamara = 1.3 \text{ m}^2 * 0.4 \text{ m}$$

Al determinar estas dimensiones, se estable que la distancia máxima que pueden tener los focos con respecto a las superficies de la cáscara de café corresponden a

40 cm y lo distancia mínima se establece con un valor de 10 cm para evitar que la alta intensidad de radiación pueda afectar las características organolépticas del sustrato cáscara de café.

Teniendo como parámetro fijo el volumen, se establece la cantidad de masa que puede procesar la cámara, este cálculo se determinó bajo el esparcimiento de residuo de cáscara sobre el área de la bandeja de la cámara que está comprendida por 1.3 m², según la media área superficial de la cáscara es 444.185 mm²

$$A \text{ Paramtro} = A \text{ Camara} \frac{1 \text{ cascara de cafe}}{\text{Area de cascara}}$$

$$A = \frac{1300000 \text{ mm}^2}{444.185 \text{ mm}^2}$$

$$A^{\text{representado}} \text{ cascaras} = 2926.708 \text{ cascaras de cafe aproximadamente}$$

Factor de gradualidad, esto es un valor que representa el porcentaje máximo permitido en la cámara. La finalidad del factor de gradualidad sobre el modelo simulado es limitar los datos de estudio.

$$\text{Factor de gradualidad} = 0.7$$

$$A = A_o * Fg$$

$$A = 2926.708 * 0.7$$

$$A = 2048,69 \text{ casaras de cafe}$$

Teniendo en cuenta la tabla 9 los parámetros físicos descritos en diversos estudios la densidad relativa es de 0,333 g / cm³ y el grosor promedio de la película mesocarpio es de 11,87 mm, se estima la cantidad de masa presente en la simulación.

$$V = \frac{m}{d} \quad m = d * V$$

$$m = 0.333 \text{ g cm}^3 * 4.44185 \text{ cm}^2 * 2048.69 * 1.181 \text{ cm}$$

$$m = 5408.37 \text{ g}$$

5.1.8 Modelos de simulación

Se realizó el estudio de dos modelos de radiación UV sobre el residuo de cáscara de café, los modelos difieren de las ecuaciones de transferencia de radiación por que no existe un modelo de transferencia electromagnética de onda corta que asocie parámetros de absorbancia energética sobre un medio absorbente teniendo en cuenta los parámetros internos de la cámara germicida; por lo tanto la estrategia tomada fue la de estudiar la dinámica de ambos modelos para determinar la transferencia energética sobre el residuo, con el objetivo de estimar la energía germicida en la cinética de inactivación de los fúngicos, anexo se encuentra el estudio relacionado, como resultado se utilizó el modelo electromagnético 1, el cual presentó mejores resultados representando el fenómeno de estudio sobre la cámara, este tiene en cuenta densidad del aire, como un fluido que puede generar pérdida a muy baja escala del haz de luz irradiado. Los parámetros para la simulación se encuentran en la siguiente tabla y asocian el medio de transferencia, el foco emisor y la superficie receptora.

Tabla 9. Parámetros de simulación ambiente para ambos modelos.

Parámetro	Valor
Coeficiente de Absorbancia aire	274 [m ⁻¹]
Densidad del aire	1.225 kg m ⁻³
Densidad de LLDPE	930 kg m ⁻³
Potencia de lámpara UV	30w (12w UV-C/0.87) (10.44w)
Emisividad de lámpara	0.89

Coeficiente de absorbanza del sustrato	0.4519 m ⁻¹ .
--	--------------------------

5.2 Método de simulación

Para proponer una cinética simulada de inactivación por radiación UV-C sobre los hongos *Penicillium digitatum* y *Cladosporium cladosporioides* en la cáscara de café a partir de la dosis absorbida se determinó a través del análisis de documentación la distribución de las especies en fruto. Se seleccionaron estas dos especies debido a que son las que se presentan en mayor proporción en la cáscara de café (Silva et al., 2000).

Se establecieron dos criterios para simulación computacional los cuales son: determinación de distribución de los microorganismos en la malla de estudio escalada y crear un modelo sobre la dosis de radiación UV-C recibidas por la capa superficial que ataquen la lógica propuesta de los procesos metabólicos de los fúngicos, dando como resultado un comportamiento inhibitorio. Este último tiene en cuenta la absorbanza del sustrato a la dosis y la interacción inhibitoria que tiene la radiación sobre el modelo metabólico. Además, se ajustó a la simulación parámetros de relacionamiento los cuales fueron pH entre 5 y 6.46, actividad acuosa entre 0,60 y 0,80, porcentaje de humedad entre 50-80 %, coincidiendo con estados de madurez DDA 231, los cuales fueron extraídos de la literatura (Daniela & Arrieta, 2021; Noriega Salazar et al., 2009). Se especula que el tratamiento se realiza sobre muestras de cáscara de café que tiene una distribución normal uniforme de carga másica, es decir que igual que en la simulación del objetivo 2 en la bandeja de cámara solo existe una película de cáscara de café y no hay cáscaras superpuestas entre ellas. Se descarta el efecto inhibitorio por parte de la concentración de fenoles para muestras que han perdido gran cantidad de actividad acuosa.

El crecimiento de los mismos sobre el sustrato de café es totalmente al azar bajo una distribución *Poisson-Gamm* y depende de factores externos e internos como la

velocidad de crecimiento, alimento para reproducción, composición química del sustrato, temperatura de cámara, tiempo de reproducción, controles biológicos, segmentación de log UFC / g, tiempo de supervivencia del microorganismo / g (asociado a alimentos del sustrato), pH de sustrato, gases presentes en el medio (oxígeno, nitrógeno, Co₂, etc).

Para la simulación se estableció la malla de estudio de 100 x 100 box, las cuales estudian el espacio de cámara que contiene la capa delgada de cáscara de café, bajo las condiciones establecidas en la simulación de incidencia de radiación, donde no hay cáscaras superpuestas con otras, y existen diferentes geometrías, áreas y texturas, dadas por los parámetros morfológicos. El mallado estudia 5408g de cáscara de café, el sustrato ocupado un área de 800 x 800 mm de la cámara germicida, la radiación promedio aparente recibida por la superficie expuesta en la cámara con lampara Phillips a una distancia de 30 cm es 3.086×10^6 W/mm² equivalente a 3.08 W/m² y a 0,003086kJ/cm², y se utilizó como parámetro de variación o r^2 de 0.84. Además, Se iterará la simulación en función el tiempo, hasta alcanzar la dosis de eliminación, la cual fue tomada en la recopilación de información, se ajustó una dosis promedio de 170 mW/cm² equivalente a 1.7 kW/m² o 1.7 kJ/m² s para los dos tipos de hongos.

5.2.1 Capacidad de hongos control sobre simulación

Se realizo un análisis de documentos para determinar la presencia de los hongos en el fruto de *Coffea Arábica*, con el objetivo de especificar la concentración UFC por gramo, parámetros a utiliza en la simulación de Monte Carlo, con el objetivo de determinar bajo condiciones ideales de crecimiento cual es la propagación que tienen los fitopatógenos sobre la casa estudiada, así mismo este resultado pertio discutir y comprar la cinética de inhibición respecto al crecimiento potencial de lo hongos.

(Silva et al., 2008)(Silva et al., 2008) realizo un trabajo donde aisló y caracterizar hongos filamentosos presentes en diferentes etapas de cosecha, fermentación,

secado y almacenamiento de granos de café procesados por método natural. Las cerezas fueron recolectadas a mano y luego colocadas en una plataforma de secado de cemento donde permanecieron hasta alcanzar el 11% de humedad. Los recuentos de hongos en las cerezas de café recolectadas del árbol (tiempo 0) fueron de alrededor de 1.5×10^3 UFC/ g. Este número aumentó lentamente durante la fermentación y el secado alcanzando valores de 2×10^5 UFC/g dentro de los 22 días de procesamiento. *Cladosporium cladosporioides* y *Penicillium digitatum* fueron las especies más frecuente encontrada en cerezas en el árbol (tiempo 0), en los granos durante la fermentación hasta el día 12 y en granos almacenados en sacos de yute durante 84 y 136 días.

Tabla 10. Conteos totales de hongos filamentosos, humedad relativa y la actividad del agua de los granos de café durante la fermentación y el secado. Fuente (Silva et al., 2008)

Tiempo (días)	cuenta (UFC/g)	Humedad relativa (%)	Agua actividad
0	1.5×10^3	67.45	> 0.85
2	2.8×10^3	60.83	0.85
4	5.9×10^3	38.85	0.85
6	7.6×10^3	29.35	0.85
8	2.0×10^4	28.56	0.85
12	4.0×10^4	19.72	0.82
14	6.8×10^4	19.3	0.82
16	9.0×10^4	19.7	0.82
18	1.7×10^5	15.78	0.71
20	2.0×10^5	12.9	0.63
22	1.6×10^5	11	0.52

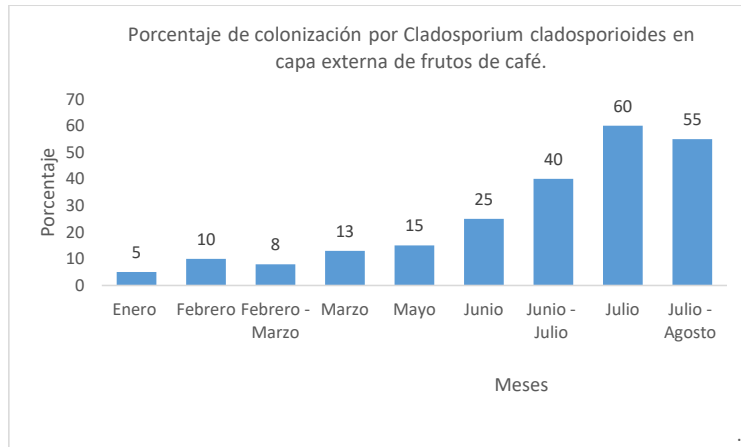


Figura 17. Porcentaje de colonización por *Cladosporium cladosporioides* en la comunidad interna de frutos de café. Fuente (Pereira Galvão et al., 2005). (Pereira Galvão et al., 2005). Esta información representa la carga en aumento de *Cladosporium cladosporioides* sobre el fruto de café a mayor grado de madurez representado en un ciclo regular de cosecha.

Con formato: Fuente: Sin Cursiva

El porcentaje de colonización de por *Cladosporium cladosporioides* difiere del estado de madurez, para el estado pintón DDA 224 se ajusta entre 40 y 45 %, estado maduro DDA 231 entre 55% y 53% y sobre maduro DDA entre 55% y 40%. El estado maduro tiene un porcentaje más alto de colonización, este estado es más susceptible a la colonización de mohos y levaduras por su actividad de agua. Por lo tanto, se tomó los siguientes valores iniciales para cada microorganismo:

UFC *Cladosporium cladosporioides* = 7.5×10^6 UFC / g, % colon = 45-55%

UFC *Penicillium digitatum* = 3.3×10^6 UFC / g, % colon = 35-50%

5.2.2 Control de proceso - comportamiento de micelios

La hipótesis para la simulación del crecimiento fúngico fue que en cada espacio de la malla del área de cámara puede crecer un microorganismo de cualquiera de las dos especies y el sustrato de cáscaras lo utilizan para reproducirse.

La dinámica del crecimiento del diámetro fúngico o aumento de biomasa micelial está en función de los parámetros de fermentación e inclusive frente a situaciones de estrés (Deacon, 2006; Huang et al., 2010). Varios modelos se han aplicado para describir la cinética del crecimiento del diámetro micelial en distintos tipos de cultivo, como el modelo lineal, exponencial, entre otros (Viniestra-González et al., 1993; Mitchell et al., 2004). Para la determinación de la dinámica del crecimiento del diámetro promedio micelial se utilizó la ecuación diferencial propuesta por Sarikaya y Ladisch (1997) (ecuación 36).

Ecuación 36
$$\frac{dD}{dt} = \mu_1 D - k_1 D^2$$

Donde: D= diámetro de crecimiento micelial (mm), t= tiempo (días), μ_1 = la tasa específica de crecimiento (días⁻¹), K= es el diámetro máximo de crecimiento micelial (mm) y $k_1 = \mu_1 K$ es el factor de retención de crecimiento. Cuando el crecimiento del D es pequeño, el facto $k_1 D^2$ es insignificante, por lo que la población microbiana tiene un crecimiento exponencial. Sin embargo, si la cobertura de la superficie por biomasa microbiana es grande, la tasa de crecimiento del micelio se reducirá como resultado de la competencia de una población en crecimiento por un sustrato limitado; es decir, el efecto de la competencia estaría relacionado solo con la longitud de hifas.

El modelo de la dinámica del crecimiento micelial, obtenido de la integración de dD/dt , ajustado a los datos fue:

Ecuación 37
$$D(t) = \frac{K}{1 + C e^{-\mu_1 t}}$$

donde: $C = c/k_1$, y c es la constante de integración.

A

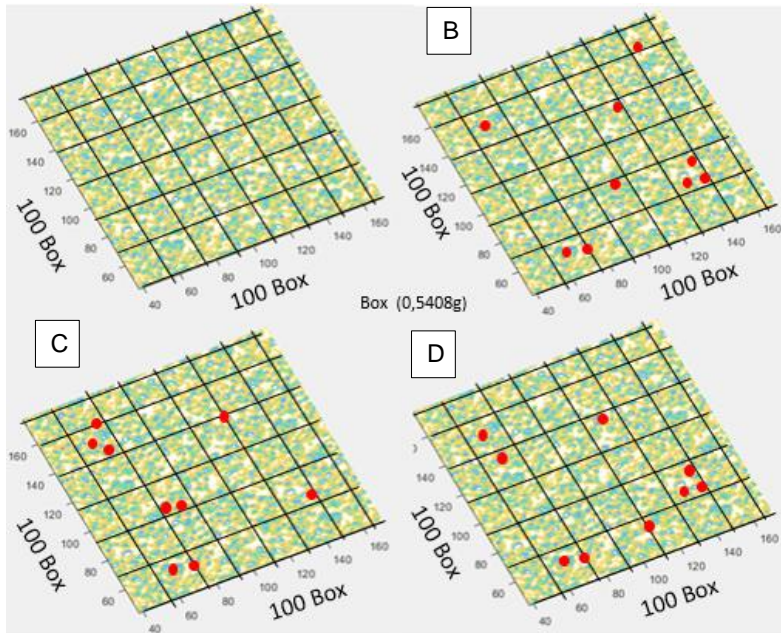


Figura 18. Mallado de la 100x100 de cámara, cajas de residuo de cáscara y distribución de colonias. A. Muestra de área superficial simulada control sin distribución de colonias, B,C,D. Muestra de 3 iteraciones simuladas de distribución pseudoaleatoria de colonias de hongos sobre sustrato de cascara de café

Como se muestra en la figura 18, el mallado de estudio está separado por bloques de 100 box para la simulación que estima el crecimiento de hongos, y se visualiza con color rojo la posición del hongo sobre el mallado, que representan el potencial de UFC de los fúngicos de estudio, bajo la distribución *Poisson- Gamm* de 4 iteraciones.

Para cada una de las iteraciones ocurrieron los siguientes pasos, en el tiempo 0 se realizó una distribución pseudoaleatoria de colonias potenciales de supervivencia y adaptabilidad sobre el mallada y para tiempos mayores a 0, el algoritmo evaluaba cada una de las cajas para determinar si en la posición que media contenía una unidad potencial colonizadora en el sustrato.

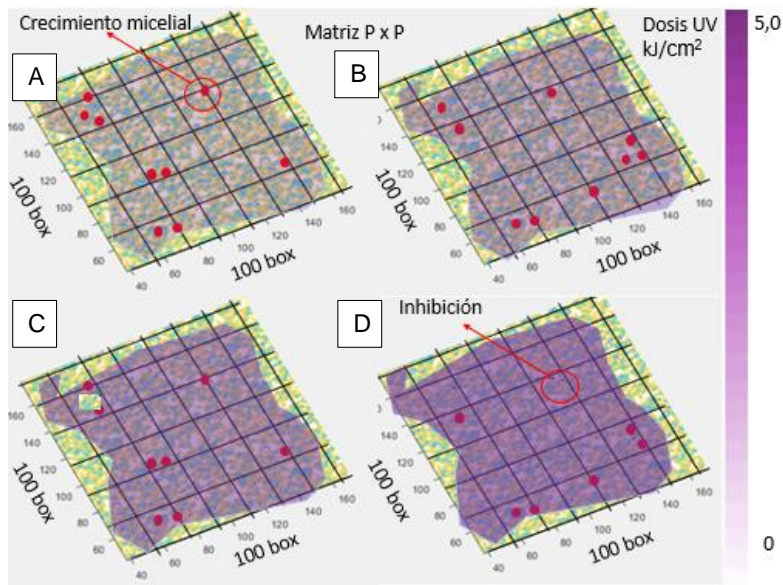


Figura 19. Descripción visual de la dinámica simulada en el efecto inhibitorio del Dosis absorbida en la matriz P x P sobre *Penicillium digitatum* y *Cladosporium cladosporioides*. Muestra de 4 diferentes capturas de la simulación de inhibición hongos sobre sustrato de café (A,B,C,D). En color morado dosis recibida por el área superficial. Puntos rojos UFC para cada iteración.

Se realizaron múltiples iteraciones (APM) sobre la malla de estudio con el modelo A de intensidad radiante sobre el área de estudio fijando a 30 cm la lámpara UV con potencia 12 w nominales UV. Bajo esta premisa la Intensidad de radiación absorbida por el medio era de $3,086 \times 10^6$ W/mm² cada segundo iterado. Cuando las cajas de estudio iteradas bajo el Método Montecarlo lleguen a una dosis de 1.7 kW/mm² se detuvo las iteraciones.

5.2.3 Distribución Gamma- Poisson en *Penicillium digitatum* y *Cladosporium cladosporioides*

En la simulación de la cinética de inactivación, se tuvo en cuenta que cada caja contenía 0.5408 g de cáscara de café y tiene una dimensión de 8x8 mm. Esto quiere decir que, con respecto a la distribución de microorganismos, pueden ubicarse el

Con formato: Sin Resaltar

doble del valor inicial por cada caja, Cabe resaltar que no todos los microorganismos alcanzan la fase adaptativa y pueden colonizar si no que esto depende de la permitividad de supervivencia. Se ajusto que solo el 12 % de las potenciales colonias son capaces de replicarse y colonizar. El porcentaje de colonias que sobreviven se estipulo por la tabla de colonización de *Cladosporium* y *Penicillium* mencionada anteriormente.

La distribución de los microorganismos obedece una distribución *Gamma -Poisson*, los valores de Alpha y beta se ajustaron bajo la distribución de Varianza y Esperanza de datos recolectados.

UFC *Cladosporium cladosporioides* = $7,5 \times 10^6$ UFC / g, % colon = 45-55%

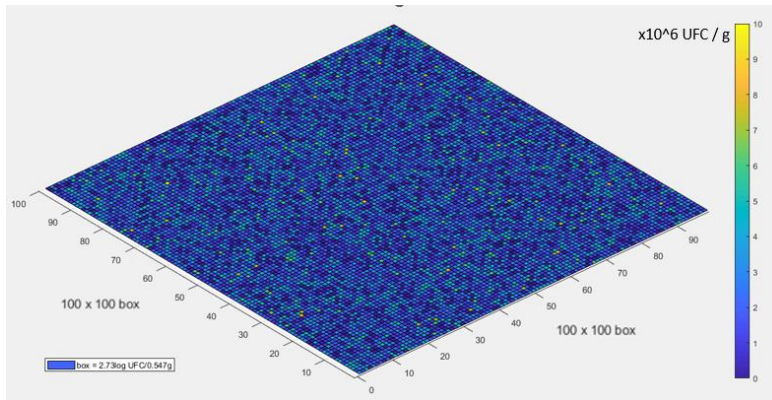
UFC *Penicillium digitatum* = $3,3 \times 10^6$ UFC / g, % colon = 35-50%

$$\textit{Cladosporium } S(c) = 7,5 \times 10^6 \frac{\text{UFC}}{g}, \alpha = 3,87, \quad \beta = 1,88$$

$$\textit{Penicillium } S(c) = 3,3 \times 10^6 \frac{\text{UFC}}{g}, \alpha = 2.14, \quad \beta = 1.54$$

En donde $S(c)$ representa la concentración máxima que puede llegar a colonizarse para cada caja de la malla de estudio de hongo en UFC/g, α corresponde al coeficiente poisson que describe la probabilidad de que ocurra un número específico de concentración de colonias en un intervalo de cajas, suponiendo que la tasa de ocurrencia de eventos es constante para cada hongo y β corresponde al coeficiente gamma que describe la distribución de probabilidad de la aleatoria de la concentración de colónicas. Estos valores se introdujeron como parámetros en la herramienta *Random Number Generation tool* de Matlab y se ajustó los ejemplos de salida respecto a la matriz resultante (10000) cajas de 0.5408 g de cáscara de café. Se procedió a exportar los datos por cada replica de la simulación. Se importo en el modelo de la cinética de inactivación y se ubicaron los valores aproximados de la distribución de microorganismo, luego se tomó en cuenta el porcentaje de colonización ajustado.

Distribución Gamma-Poisson de UFC sobre matriz de estudio



Conteo de la cantidad UFC sobre la matriz de estudio

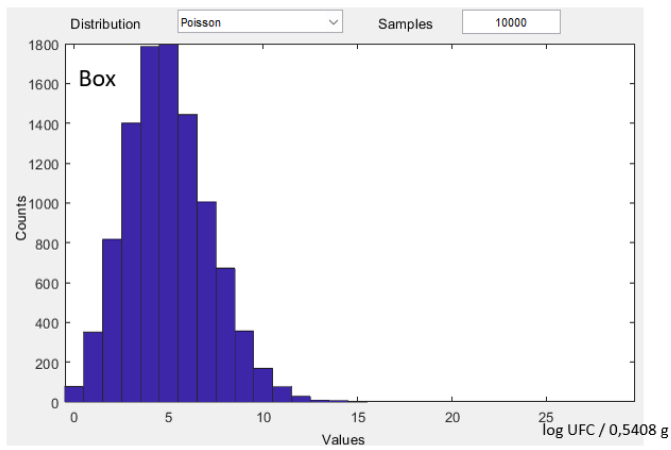


Figura 20. Distribución Gamma-Poisson en la aleatoriedad de muestras de cáscaras en la cámara germicida. Fuente: Autor. Histograma del conteo de UFC

máximo para una iteración de la simulación de Montecarlo distribuido sobre el mallado de estudio

5.2.4 Simulación crecimiento de microorganismos en sustrato de cáscara de café

La simulación de inactivación se realizó en dos partes, la primera es una simulación que busca evaluar la supervivencia y crecimiento de *Penicillium digitatum* y *Cladosporium cladosporioides* ya que la variabilidad del crecimiento de estos microorganismos depende de la cantidad de sustrato, como medio de alimentación, temperatura, pH; sin embargo nuestro modelo de simulación de crecimiento micelial, solo comprende el tamaño de crecimiento expresado en una matriz, cantidad de alimento, y supervivencia del microorganismo.

El modelo de crecimiento está basado en la propuesta por Moreno Zapata (2010) la cual consiste en un modelo en cajas con microorganismos iniciales ubicados aleatoriamente. Se ajustó esta variable para que tenga un comportamiento pseudoaleatorio bajo la distribución poisson-gama la cual es más usada en modelos de distribuciones de crecimiento de microorganismos.

En cada iteración de Monte Carlo, seleccionó al azar una posición de la matriz y si la posición está ocupada por un microorganismo, busca replicarse en alguna caja vecina que contenga alimento disponible, al encontrar una caja no ocupada, este se establece allí y el microorganismo disminuye el alimento de esa casilla en una unidad; si no se encuentra ninguna caja vecina disponible el algoritmo continúa iterando sobre una casilla elegida aleatoriamente. Pero si la caja elegida en primera instancia no contiene ninguna participación de microorganismo, esta sigue iterando de forma aleatoria sobre la matriz, hasta que encuentra una caja que contenga una concentración de UFC con potencial de crecimiento sobre el sustrato. Cabe resaltar que, si n cantidad de cajas empezaron su crecimiento, estas esperan a que coincida la siguiente iteración con esa posición de caja para alimentarse y replicarse simulando la etapa de adaptabilidad, crecimiento y por último de muerte por no contener más alimento. Los datos de formación de colonias para el sustrato de café

total, corresponde a 11 log UFC/g para *Penicillium digitatum* y 24 log UFC/g para *Cladosporium cladosporioides*, por lo que en este caso la iteración de datos a través de Monte Carlos es larga y genera un tiempo demorado de respuesta para la matriz inicial de 800x800, así que realizaremos una escalabilidad del modelo de 1:8, para iterar sobre una matriz de 100x100.

Con formato: Sin Resaltar

Para el algoritmo de *Penicillium digitatum* ajustamos una cantidad de microorganismo iniciales de 26.4 logUFC/8 g equivalente a 3,3 log UFC /g, a razón del escalado el tamaño que representa 1g de sustrato es de 1x1 cajas. Se ajustaron la vida de los microorganismos a una escala de $CV=UFC * 10$, lo que equivale que por cada ejecución del bucle o iteración del algoritmo este tiene un tiempo de supervivencia de $CV=90$, el alimento ajustado $CA=10$, factor de disminución de vida para microorganismos alimentándose $DV=1$, factor de disminución de vida para microorganismos sin alimentarse de $DVSA=1$, y se dispone a poner 9 microorganismos iniciales de forma aleatoria.

Con formato: Sin Resaltar

Para el algoritmo de *Cladosporium cladosporioides* representan 60 log UFC/g equivalente a 7.5 log UFC/g para la matriz 100x100, y se ajustaron las variables del modelo de la siguiente manera supervivencia de $CV=30$, el alimento ajustado $CA=10$, factor de disminución de vida para microorganismos alimentándose $DV=1$, factor de disminución de vida para microorganismos sin alimentarse de $DVSA=1$, y

se dispone a poner 3 microorganismos iniciales de forma aleatoria

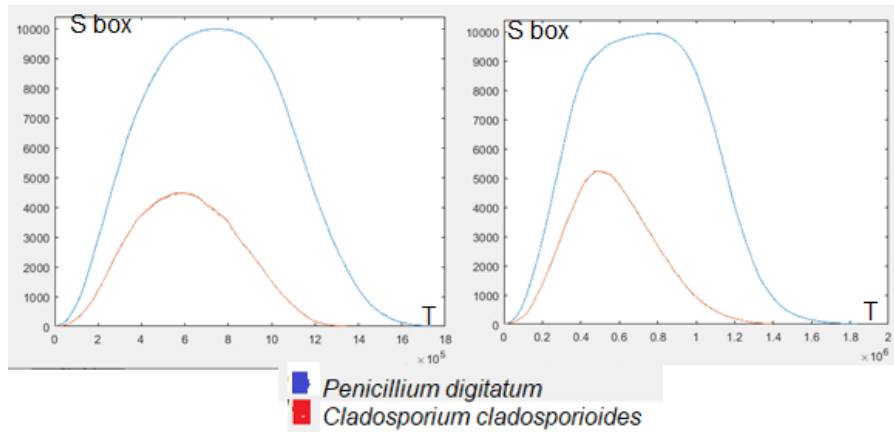


Figura 21. Simulación de Montecarlo aplicada a modelos de crecimiento microbiano para *Penicillium digitatum* (línea azul) y *Cladosporium cladosporioides* (línea roja). Fuente: Autor. Graficas de dos iteración hechas en Matlab expresando la curva simulada de crecimiento bajo los parámetros de los hongos

El resultado de las iteraciones en la ejecución de la simulación del modelo Montecarlo se puede ver representada en la figura 21, para los hongos modelo, donde se identifica las etapas de crecimiento, estacionamiento y muerte de los microorganismos. Para la etapa de crecimiento se realizó una captura e aislamiento de datos con el fin de obtener una respuesta estadística del comportamiento y así lograr describir los datos para cada microorganismos bajo un el modelo matemático de Gompertz, la cual es una función sigmoidea que describe el crecimiento como más lento al comienzo y al final de un período de tiempo dado, el tiempo de este modelo se expresara bajo un unidad segundo del desarrollo de ejecución del algoritmo, que consecuentemente será ajustado al tiempo máximo que tardo el crecimiento de todos los micelios para igualarse a la cantidad máxima de área superficial de sustrato de cáscara de café.

La simulación de cada microorganismo se realizó por separado ya que el crecimiento en conjunto de dos especies de microorganismos en un mismo

Con formato: Sin Resaltar

ambiente interfiere con su crecimiento ideal, ya que los procesos metabólicos de cada uno son diferentes y alteran directamente el del otro.

Como respuesta a esta simulación se obtuvo la siguiente grafica representada en la figura 21 que describe la cinética de crecimiento para cada hongo en la malla de estudio escalada de 100x100 cajas equivalente cada una de ella a 8g de sustrato de cáscara de café. Para ver mas detalles de este apartado puede investigar el anexo Metodología. Los datos generados se compararon con la estimación de la curva para el modelo Gompertz, para tener una ecuación de cada hongo con la cual se creó la cinética de inhibición.

5.2.5 Cinética de inactivación modelo Weibull

Ahora, la cinética de inhibición para cada hongo se consideró teniendo en cuenta las ecuaciones resultantes de comportamiento de replicación y crecimiento que tienen los hongos sobre la malla de estudio, en la siguiente imagen podemos visualizar el crecimiento de *Penicillium digitatum* y *Cladosporium cladosporioides* y se asemejo la respuesta de las iteraciones del modelado de Montecarlo al Modelo Gompertz.

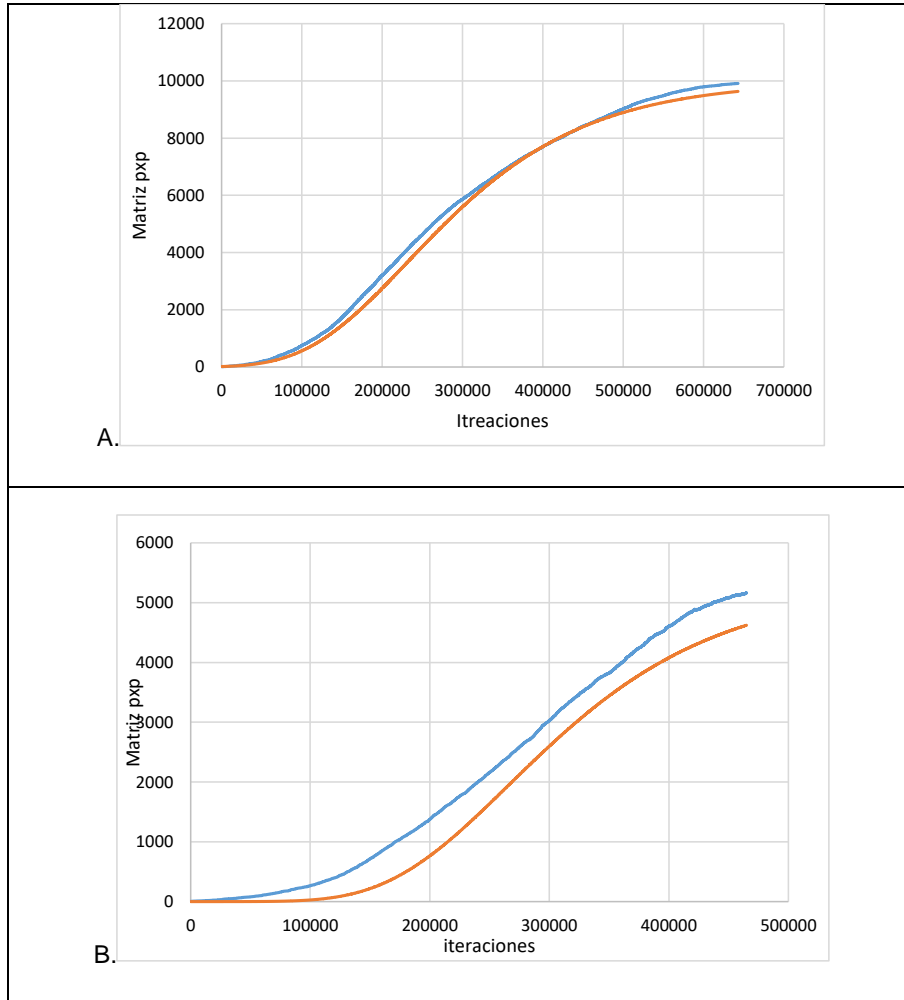


Figura 22. Modelamiento Gompertz para resultados de simulación *Penicillium digitatum* y *Cladosporium cladosporioide*. A) Curvas de crecimiento simulada por Montecarlo y Gompertz para *Penicillium digitatum*, B) Curvas de crecimiento simulada por Montecarlo y Gompertz para *Cladosporium cladosporioide*

Línea azul representa los datos resultado de Matlab y línea naranja la aproximación al modelo Gompertz.

El modelo Gompertz simulado de cada hongo, fue trasladado y replicado en Excel con el objetivo de estimar bajo la regresión lineal un modelo de crecimiento que pudiese ser aplicado a la simulación de inhibición. La ecuación que describe la tasa de crecimiento sobre un área de 100x100 cajas para el *Penicillium digitatum* con una distribución de 3.3×10^6 UFC/g distribuidas aleatoriamente sobre el área de estudio y ambiente ideal y modelo Gompertz es:

Ecuación 38

$$S (\text{Penicillium digitatum}) \text{ Gompertz } f(t) = 10000 * e^{-6.39} e^{-8 \times 10^{-6} * t}$$

con una dispersión de datos de $R^2 = 0,9842$, esto significa que modelo describe muy bien la cinética de reproducción y metabolismo que tiene el microorganismo en cuestión. Dado que el tiempo esta descrito en iteraciones de ejecución, esto quiere decir que cada iteración del software para esta especie se ejecutó en 9.35×10^{-4} s.

La ecuación que describe la tasa de crecimiento sobre un área de 100x100 cajas para el *Cladosporium cladosporioides* con una distribución de 7.5×10^6 UFC/g distribuidas aleatoriamente sobre el área de estudio y ambiente ideal y modelo Gompertz es:

Ecuación 39

$$S (\text{Cladosporium cladosporioides}) \text{ Gompertz } f(t) = 5300 * e^{-14.31} e^{-1 \times 10^{-5} * t}$$

con una dispersión de datos de $R^2 = 0,9451$, esto significa que modelo describe muy bien la cinética de reproducción y metabolismo que tiene el microorganismo en cuestión. Dado que el tiempo esta descrito en iteraciones de ejecución, esto quiere decir que cada iteración del software para esta especie se ejecutó en 1.91×10^{-4} s.

Teniendo en cuenta la aproximación a la curva mediante el modelo Gompertz la constante de crecimiento K para *Penicillium digitatum* equivale a 8×10^{-6} y la

constante de relación con casos iniciales equivalentes es de 6.39, la cual tienen en cuenta que la máxima participación de población sobre la prueba es de 10000 cajas ocupadas con log UFC.

La constante de crecimiento K para *Cladosporium cladosporioides* equivale a 1×10^{-5} y la constante de relación con casos iniciales equivalentes 14.31 log UFC teniendo en cuenta que la máxima participación de población sobre la prueba es de 10000 cajas ocupadas con UFC, sin embargo para este experimento se tuvo en cuenta que la relación de crecimiento que tienen la composición química con su metabolismo no es el más óptimo por lo tanto este microorganismo solo fue capaz de reproducirse hasta por 5300 cajas con UFC respectivamente.

Para crear la cinética de inhibición de los hongos se tomó como referencia en la simulación la cantidad máxima de cajas en las que podría llegar a replicar el microorganismo y el coeficiente o constante de crecimiento de esta, anteriormente presentadas. La constante de crecimiento de cada hongo se parametrizó como el criterio a resolver, ya que este expresa la cantidad máxima de crecimiento que puede llegar a crecer de cada uno sobre el sustrato de cáscara de café para este trabajo. Luego, se trasladaron los datos de las iteraciones de la distribución poisson-gamma a Excel para establecer la estimación de inhibición respecto a la ecuación de Weibull para cada hongo y se utilizó la técnica de mínimos cuadrados para estimar la aproximación logarítmica del modelo en función de la intensidad UV que recibía cada caja de estudio. Luego esta iteración realizada en Excel se transformó a un modelo logarítmico que describiera la inhibición de las cantidades máximas de hongos calculadas en el sustrato de café. Si desea ver el detalle de los datos puede ver los anexos de Excel, CinéticaInactivaciónMicroorganismos.

Ecuación 40

$$y = a m + b$$

Cladosporium cladosporioides

$$y = \log_{10}(S), \quad a = 5300 \text{ cajas}, b = e^{2.6613}, m = -1 \times 10^{-6}$$

Penicillium digitatum

$$y = \log_{10}(S), \quad a = 10000 \text{ boxes}, b = e^{1.855}, m = -8 \times 10^{-6}$$

El modelo seleccionado para modelar la cinética de inhibición fue Weibull, ecuación 32, ya que interpreta la heterogeneidad de oposición de cada microorganismo a UV en la simulación, esto se traduce a que cada microorganismo tiene una resistencia a la radiación UV única, este se compone de dos variables determinantes para la inhibición, los cuales corresponde a resistencia UV y curva de supervivencia (Peleg & Normand 2009; Geeraed et al. 2000).

$$\text{Log } N_t = \text{Log } N_0 - \left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta \rightarrow \text{Log } S(t) = \text{Log } S_0 - \left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta$$

Ecuación 41

$$S = S_0 * e^{-\left(\frac{D}{D_0}\right)^\beta} \rightarrow S(t) = S_0 * e^{-\left(\frac{It}{D_0}\right)^\beta}$$

Teniendo en cuenta a Geeraerd et al. (2000) y la interpretación de ecuaciones weibull con modelos de inhibición microbiológica, la cinética de dependerá del coeficiente de resistencia las UFC de microorganismo a la irradiación de UV, donde S es la fracción de microorganismos que sobreviven después de la exposición a la dosis de radiación UV, parámetro que es único para cada especie y cepa. S_0 es la fracción de microorganismos que sobreviven a una dosis de radiación cero (es decir, la población inicial). D es la dosis de radiación aplicada equivalente a Intensidad por tiempo. D_0 es una medida de la resistencia de un microorganismo a la radiación UV. Un valor alto de D_0 indica que un microorganismo es más resistente a la radiación UV que un microorganismo con un valor bajo de D_0 . β describe la curva de supervivencia, valores mayores de β indican una muerte más gradual, lo que significa que la tasa de muerte aumenta con la dosis de radiación.

6. Resultados

Morfología de cáscara de *Coffea Arábica*

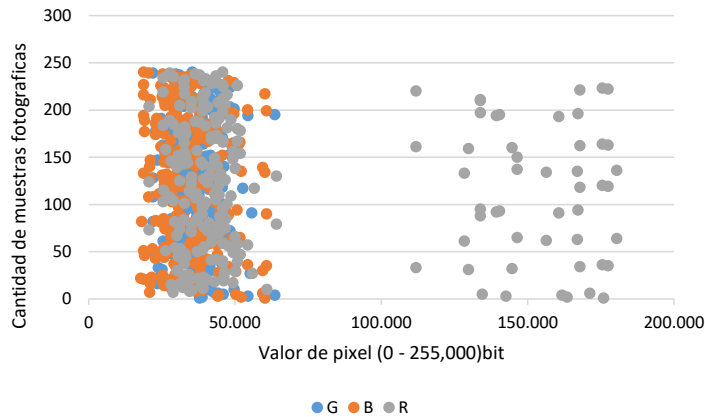


Figura 23. Distribución de valores RGB para 240 muestras de fruto *Coffea Arábica*.

Como se muestra en la figura 23, la distribución que tienen los valores RGB los frutos seleccionados en la recolección y se indentificó que los componentes Blue y Green tienen una distribución pseudoaleatoria normal con media aritmética de $\mu_B = 41$ con C.V. 13.57 y μ_G con C.V. 18.52. El componente R (Red) de las muestras tiene distribuciones muy aisladas y esto se debe particularmente a las características del fruto y su madurez, también cabe resaltar que el recuento de tomas fotográficas del fruto se realizó en 4 diferentes caras, y en cada cara se ve reflejado un componente característico del mismo, una de estas características es el ombligo del fruto, esta parte se encuentra en adherencia con el arbusto y con frecuencia es la primera parte del fruto que tiene desprendimiento de cáscara, producto de la recolección, la media aritmética fue de $\mu_R 136$ con C.V. 25.7. Este corresponde al coeficiente de variación más alto, sin importar los algoritmos de segmentación y ajustes de imagen los frutos tienen una alta dispersión de datos del componente rojo. Al igual que [Marín López et al., \(2003\)](#) (Marín López et al., 2003) las muestras de recolección se agrupan en estados Pítones y Maduros

pertencientes a 210 ddf y 217 ddf equivalentes a DDA 224 y 231 respectivamente, los cuales tienen mayor concentración másica y se le tribuye mayor calidad en la cadena de producción, además bajo la inspección de remanentes de contaminación en la fotografía los estados DDA 231 y DDA 238 tenían concentraciones de ruido más localizados que representan altos porcentajes de granos atacados por insectos, entre el 7.12 al 13.81%, factor que va en detrimento.

La clasificación de estado de madurez es igual a la estimada en la hipótesis, que expresaba que la selección aleatoria de muestras de forma visual estaba comprendida en estados 224, 231 y 238 bajo los criterios DDA. La importancia de haber hecho estudio con estos valores reside directamente en la concentración de pH, actividad acuosa, fenoles; variables características en el crecimiento de fúngicos sobre el fruto (Carvajal et al., 2011).

Tabla 11. Resultado de la conversión cromática de color para las muestras. Los datos se presentan como el promedio \pm desviación estándar.

DDA / estado de madurez	Color RGB			Coordenadas cromáticas y acromáticas				
	R	G	B	L*	a*	b*	C*	h*
224	120 $\pm 12,64$	56 $\pm 16,8$	68 $\pm 18,06$	37,88 $\pm 11,31$	16,79 $\pm 17,38$	11,74 $\pm 15,253$	21,4 $\pm 19,1$	34,04 $\pm 11,49$
231	116 $\pm 13,74$	54 $\pm 12,52$	67 $\pm 17,47$	35,94 $\pm 20,61$	17,9 $\pm 19,03$	11,81 $\pm 17,259$	21,77 $\pm 14,77$	32,86 $\pm 10,55$
238	98 $\pm 18,4$	46 $\pm 19,95$	59 $\pm 15,29$	30,5 $\pm 29,2$	9,7 $\pm 18,96$	2,76 $\pm 12,186$	10,12 a $\pm 18,9$	15,74 a $\pm 19,76$

La anterior tabla muestra el resultado del análisis estadístico de las muestras, los frutos maduros de 231 días tienen colores más saturados, el componente cromático fue de 17.9, teniendo el color rojo con mayor presencia en la relación del ángulo de

vector del croma R/G, coeficiente de variación de 19,03 %. Este valor fue determinante para caracterizar el porcentaje de colonización de los hongos.

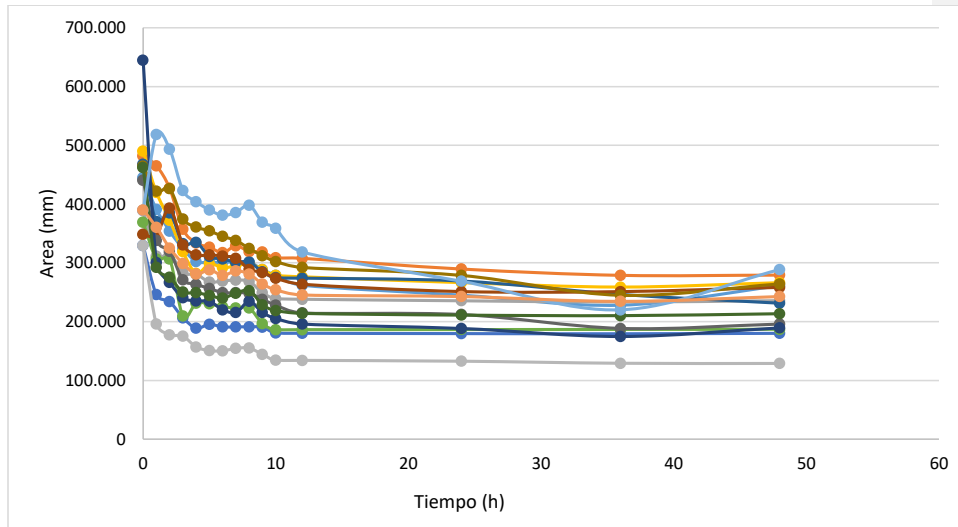


Figura 23. Áreas superficiales en función de tiempo de exposición Radiación UV de 11 muestras estudiadas elegidas de forma aleatoria.

Esta grafica expresa la disminución de área superficial que sufrieron las cascaras de estudios al estar irradiada por luz UV sobre un ambiente controlado, en donde se evidencia una reducción producto por su actividad de agua. Como se muestra en la figura 24, los resultados de la prueba experimental en la determinación de áreas en los tiempos de muestreo bajo incidencia de luz ultravioleta para 11 cáscaras. Se evidencia una pérdida del área superficial, debido a procesos extrínsecos al fenómeno de radiación UV, sin embargo, la determinación de la distribución de áreas fue parámetro en la simulación y la ecuación resultante del análisis estadístico se ajustó al área de la cámara germicida.

Tabla 12. Parámetros para el diseño del modelo simulado bajo parámetros morfológicos de la cáscara de café. Los datos se presentan como el promedio \pm desviación estándar.

DDA / estado de madurez	Tamaño (mm)			Forma (mm ²)			Lagunaridad			
	Largo	Ancho	Espesor	área	aproximación másica		Lagunaridad			Textura
	mm	mm	mm	mm ²	g	px/mm	No box	Df	Min.	máx.
224	13,39 $\pm 19,71$	16,15 $\pm 16,98$	11,06 $\pm 15,09$	439,339 $\pm 1,95$	1,95 $\pm 17,8$	C1 33,2	16957	Df 1,83	0,1	1,81
231	13,85 $\pm 14,21$	17,12 $\pm 11,39$	11,87 $\pm 12,74$	444,185 $\pm 1,99$	1,99 $\pm 11,52$	C1 33,8	18044	Df 1,84	0,09	1,81
238	13,17 $\pm 17,71$	16,5 $\pm 20,81$	11,33 $\pm 15,57$	441,914 $\pm 1,94$	1,94 $\pm 18,95$	C1 33,4	17987	Df 1,84	0,1	1,8

La siguiente tabla divulga los parámetros referencia utilizados en el modelo de simulación en Montecarlo basado en los parámetros morfológicos.

Tabla 13. Parámetros para el diseño del modelo simulado bajo parámetros morfológicos de la cáscara de café, Fuente: Autor

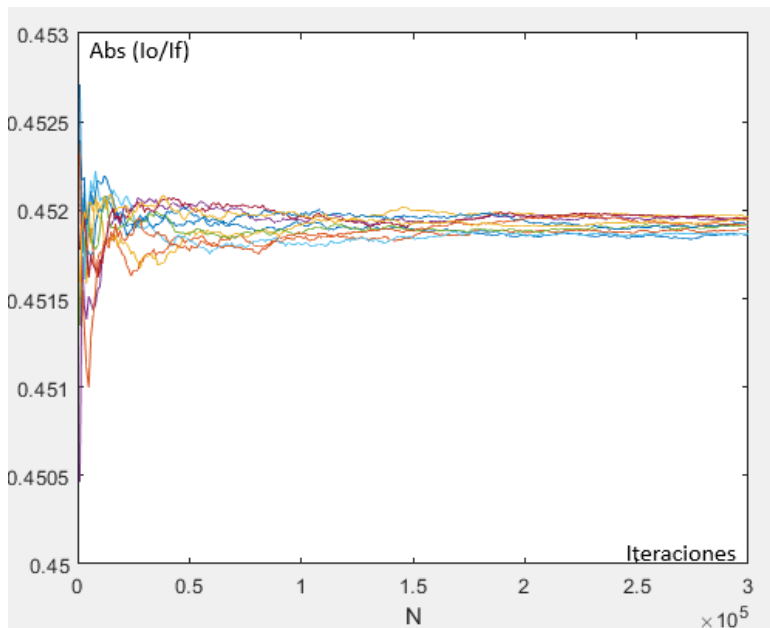
PROPIEDADES FÍSICAS		PROPIEDADES QUÍMICAS		PROPIEDADES MORFOLÓGICAS	
Densidad bruta	*(0,003g/cm ³)	Humedad	11.45%	Color Madurez, 136R,36G,41B	
Calor de combustión - g	*(4500 cal/ °C)	Lignina(fibra)	41.86%	Área superficial	444185 mm ²
Calor específico	*(1.98)	Cenizas	0.95%	Ancho	13.85mm
Difusividad térmica	*(0.413-0.576)	Grasas	5.83%	Largo	17.12mm
Conductividad	*(0.16)	Pentosas (Carbohidratos)	25.5%	Espesor	11.87mm
Emisividad (n/a)				masa	** (0.6 - 0.75 g)

* Información tomada por Armas et al., 2008. ** Información tomada por Federación nacional de cafeteros, 2021.

En la siguiente figura observaremos los resultados de la absorbancia aproximada de cáscara de café bajo los parámetros morfológicos de la distribución de espesores dados por lagunaridad.

Se procedió a ejecutar la simulación bajo el método Montecarlo para la determinación aproximada de la absorbancia de la cáscara de café, teniendo en cuenta los siguientes parámetros: cáscara en un estado de madurez de DDA 231, considera esto maduro con peso 1.99 g con C.V. 4.21, (1.99 \pm 0.083 g), distribución

de Duncan al 5% (Marín-López et al., 2003). Porcentaje de humedad de 69.70% con C.V. 1.52 (69.70 ± 1.05 %).



*Figura 25. Simulación de Montecarlo para Absorbancia de cáscara de café.
Fuente: Autor. Grafica resultado de las iteraciones de Montecarlo en la determinación de absorbancia relativa de la capa superficial de cascara de café basado en la morfología.*

La cantidad de iteraciones que se ejecutaron fue de 300000 y el tiempo de ejecución fue 0.312863 segundos y arrojo como promedio 0.4519 m-1 y un error porcentual 0.008124, sin embargo, se observa en el grafico el valor estimado de absorbancia se regula sobre las 100000 iteraciones. El resultado de la absorbancia para proponer una dinámica sobre el comportamiento de la radiación sobre el insumo de cáscara, aun así, se aclara que este valor está basado en la premisa de que el tejido celular que absorberá la radiación es homogéneo, es decir una distribución normal, pero la determinación de este valor depende la absorbancia de cada una de las propiedades fisicoquímicas que componen el tejido, así como de las protuberancias

de las cáscara, asociado a parámetros del estado de madurez(color) que pueden reflejar o absorber el haz de luz. Esto quiere decir que dependiendo de la clasificación del fruto este tiene valores diferentes de actividad acuosa, péptidos, quininas, fenoles, los cuales reproducen el color de madurez. En la simulación primaron las variables de Intensidad radiantes, la precisión de incidencia del rayo, la rugosidad del material para absorber o reflejar las ondas, la composición del a sustancia que está asociada al color.

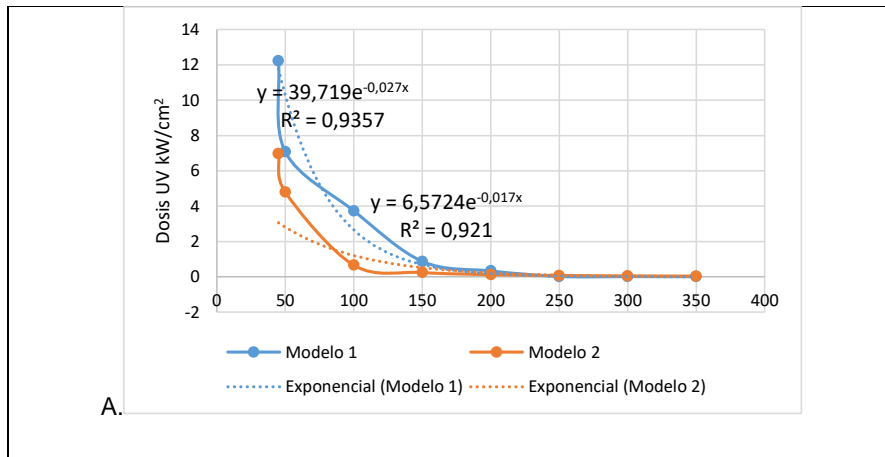
Por otro lado, la dinámica de *Cladosporium cladosporioides* es típica de los hongos saprofitos. Externamente, el hongo se presenta en la fruta durante todas las etapas de desarrollo (Pereira Galvão et al., 2005). Los granos estudiados para el análisis no presentaron ningún síntoma de daño causado por hongos o plagas, lo que puede demostrar el carácter endófito de *Cladosporium cladosporioides*. Sin embargo (Gamboa-Gaitán, 2006) asegura encontrar este hongo en hojas de heliconia como endófito, especialmente cuando las hojas inician la senescencia y establece una dificultad para detectar *Cladosporium cladosporioides* en las primeras etapas de desarrollo del fruto, esto puede estar relacionado con el impedimento de su manifestación, por inhibición de los propios compuestos del fruto, o por la presencia de otros hongos como *Phoma jolyana* var. *jolyana* Pirozynki. La población de hongos en los frutos aumenta a medida que el fruto madura, alcanzando su punto máximo en la etapa de cereza como se muestra en la figura 17.

Distribución radiantes UV

La distribución multimodal de dispersión de intensidad de radiación UV-C en la cámara depende de la geometría de foco, distancia e intensidad del foco, en la figura 26A, podemos observar dinámica de dosis sobre la superficie de la cámara para los dos Submodelos de estudio. Teniendo en cuenta que la lampara usada tiene una forma cilíndrica, el haz de luz es capaz de abarcar mayor área de irradiación, Aun así, el modelo estimo que existen zonas en las que había un diferencial de radiación, sin embargo, esta diferencia es muy pequeña siendo el R^2 0.9 para ambos Submodelos, con una incidencia media de $3,08 \text{ W/mm}^2$ con varianza de 1,2. Los

detalles del estudio de los submodelos estarán detallados para el anexo Metodología, en donde se analizan dos modelos de radiación denominados (submodelos A y B), con variables dependientes diferentes, las cuales inciden sobre el cálculo de la Intensidad sobre la superficie, por contemplar más fluidos sobre la cámara.

Esto fue relevante para estudio ya que se debía replicar el modelo de transferencia de radiación sobre un software Matlab que nos permite emular las cinéticas de inactivación sobre las iteraciones al igual que la dosis. En un software CFD convencional se analiza el flujo de fluidos, la transferencia de calor y fenómenos relacionados, más no se puede integrar cinéticas de inhibición. Por lo tanto, el modelo utilizado para la simulación de inhibición de los hongos fue submodelo A.



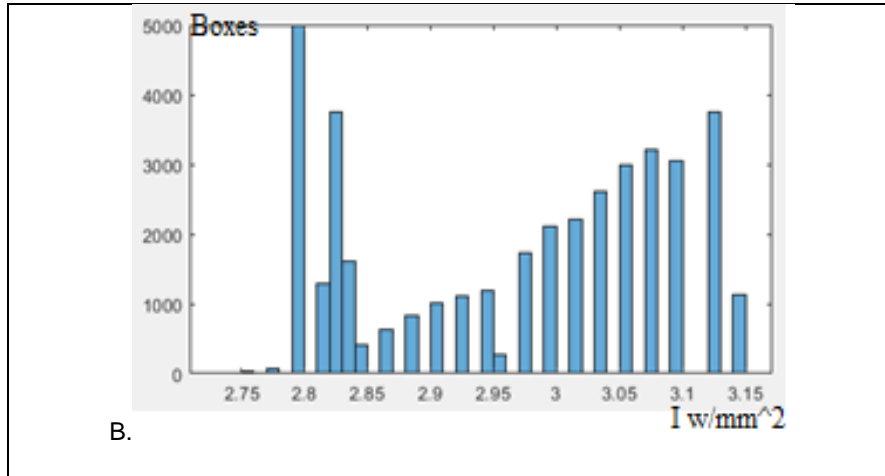


Figura 26. Análisis estadístico de los submodelos A (modelo 1) y B(modelo 2) e histograma de intensidad irradiada sobre malla de estudio. A. Regresión de curva de intensidad simulada sobre la cámara para los submodelos A y B. B. Cuento de intensidad irradiada sobre la malla de estudio para el submodelo A

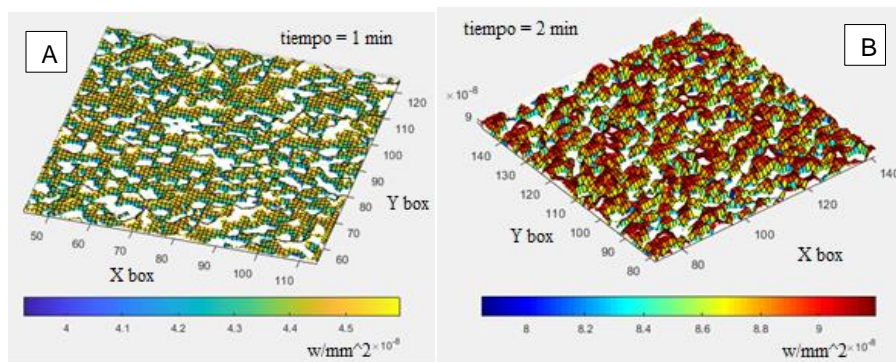


Figura 27. Cantidad de dosis absorbida en cámara germicida. distribución y magnitud de dosis recibida por sustrato de café en A. 1 minuto y B. 2 minutos.

La figura 27 muestra la dosis absorbida en 1 y 2 minutos para submodelo A. Cabe resaltar que se realizó una simulación de la Intensidad con 1, 2 y 4 focos como se puede ver en la figura 28, los cuales se denominaron Submodelos AA, AB y AC, para ver el detalle de estas simulaciones acceder al anexo Metodología. La

distribución de contorno que tuvo los vectores de radiación sobre la superficie irradiante, con un pico máximo de radiación de 0.04678 W/m^2 para el submodelo AA, la radiación que alcanzo el Submodelos AB y AC es de 0.0764 W/m^2 y 0.0845 W/m^2 para la superficie inferior y superior.

En los histogramas de cada submodelo los últimos grupos en adquirir la dosis corresponden a la materia final que alcanza esa dosis, este se refiere al área de la bandeja que no tiene materia de cáscara de café y por ello agrupa una cantidad significativa de cajas al realizar la gráfica, el comportamiento de la masa en la bandeja y absorción de radiación son importantes para describir espacios cero en donde adquiere dosis, pero no masa agrupada.

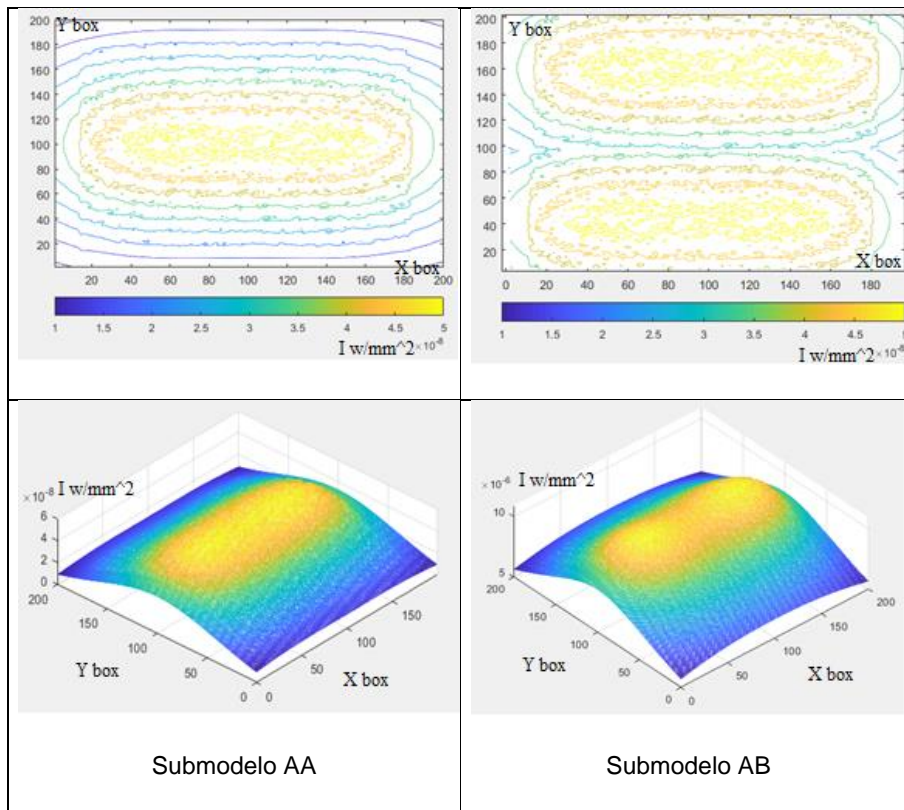


Figura 28. Distribución espectral de la intensidad de foco Phillips para 1 y 2 lámparas en el interior de la cámara germicida, submodelos AA y AB. Fuente: Autor.

Se encontró que un submodelo de 4 lámparas (AC) con una distancia horizontal de 300 mm entre las lámparas, producía la distribución de dosis más uniforme, con una intensidad de radiación media de 2.00 W m^2 . Para esta configuración, el tiempo de tratamiento necesario para lograr una inactivación de registro de *Cladosporium cladosporioides* y *Penicillium digitatum* las UFC fueron de 3 min 46 s y 1 min 36 s, respectivamente. Se ha demostrado que la simulación de radiación en combinación con el modelo de inactivación es una herramienta útil para la optimización del proceso de inactivación de UV-C.

Los tiempos en los que alcanza la dosis máxima requerida el submodelo AA es de 23.25 min, el submodelo AB 10.13 minutos y respectivamente el submodelo AC alcanza la dosis a pasar 5.31 minutos, puesto a que las lámparas tienen una longitud grande respecto al tamaño de la cámara de radiación se distribuye casi uniforme sobre la materia, de realizar estos modelos con fuentes de energía con longitudes pequeñas la distribución de vectores de radiación serían relativamente asociados a la distancia del foco de emisión con respecto a la caja de superficie incidente. El tiempo en el cual el submodelo AB alcanza la dosis requerida es casi el doble del modelo AA, debido a la uniformidad de las lámparas por su longitud tan grande y la cantidad de lámparas.

Cinética de inactivación

El resultado de la simulación de crecimiento de micelial en el área superficial de cáscara de café dio como resultado que los hongos fueron capaces de crear circunferencias alrededor del sustrato de cáscara de café y solo a partir del día 1 es capaz de notarse una distribución circular del crecimiento del fúngico, los valores establecidos son de un radio de 2.23 mm a partir de 1 día. Esto sucedió solo ajustando las variables de reproducción, que en la práctica significaría que en la cabina la humedad del medio es la media requerida para el crecimiento de los dos

hongos en cuestión, actividad de agua de cáscaras entre 60 y 70 %, pH ideal para cada uno entre los rangos (4.5 y 7).

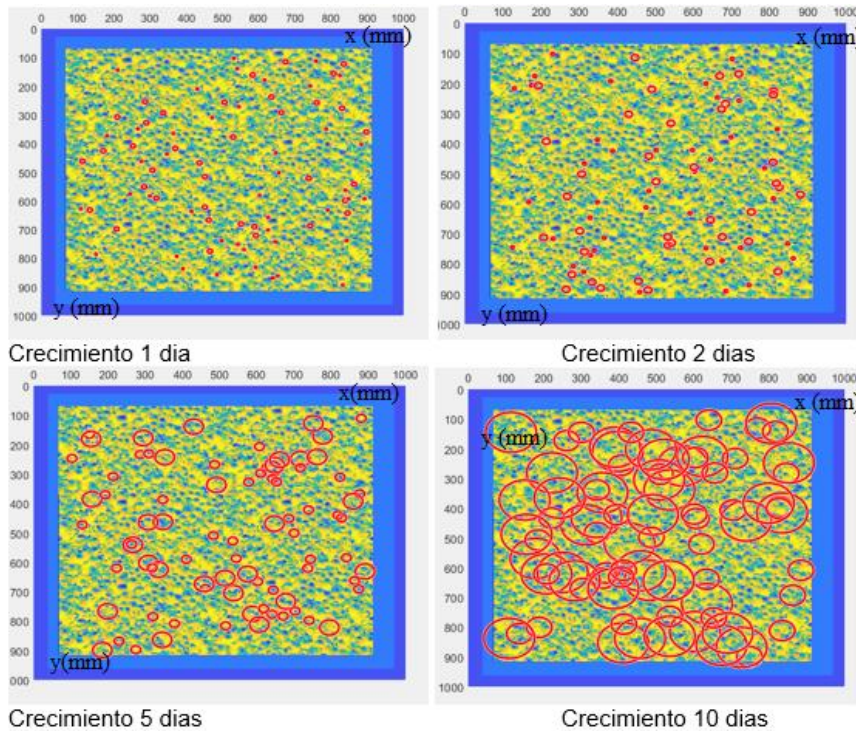
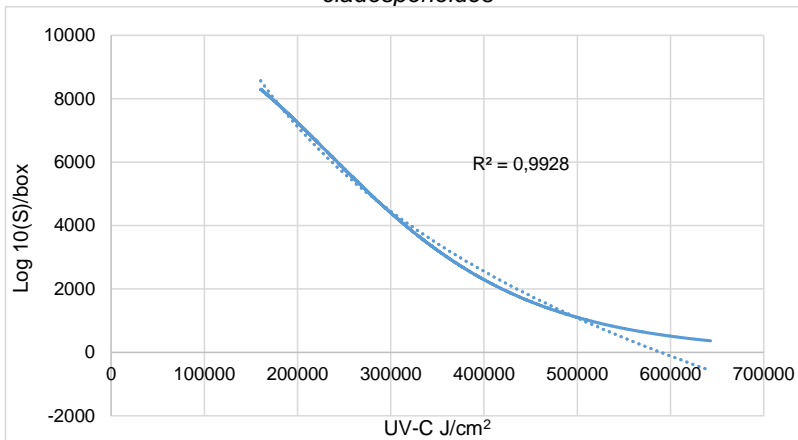


Figura 29. Distribución de micelios sobre sustrato de café bajo parámetros y distribución aleatoria para *Penicillium digitatum*. Representación simulada del crecimiento de para *Penicillium digitatum* sobre el sustrato de cascara en diferentes tiempos con condición bajo un ambiente controlad.

La cantidad de iteración corridas en el modelo Montecarlo en las 10 replicaciones para la determinación de efecto inhibitorio de *Penicillium digitatum* y *Cladosporium cladosporioides* están comprendidas en 567.401 y 399.974.

Se extrajeron los datos de la simulación y se importaron en Excel para realizar la aproximación logarítmica del comportamiento inhibitorio, dando como resultado los siguientes valores expresados en la figura 30.

Estimación logarítmica del modelo cinético de inactivación *Cladosporium cladosporioides*



Modelo Weibull en inhibición Crecimiento *Cladosporium cladosporioides*

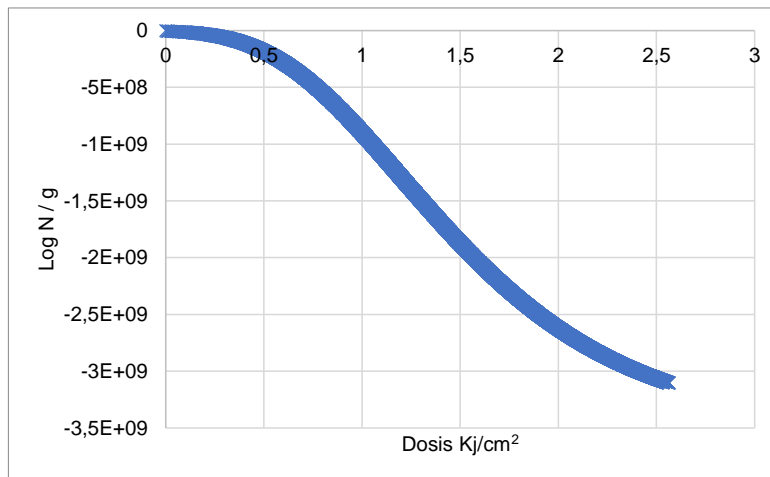


Figura 30. Grafica de cinética de inhibición *Cladosporium cladosporioides*. Log (s) vs Dosis (kJ/cm²). Fuente Autor

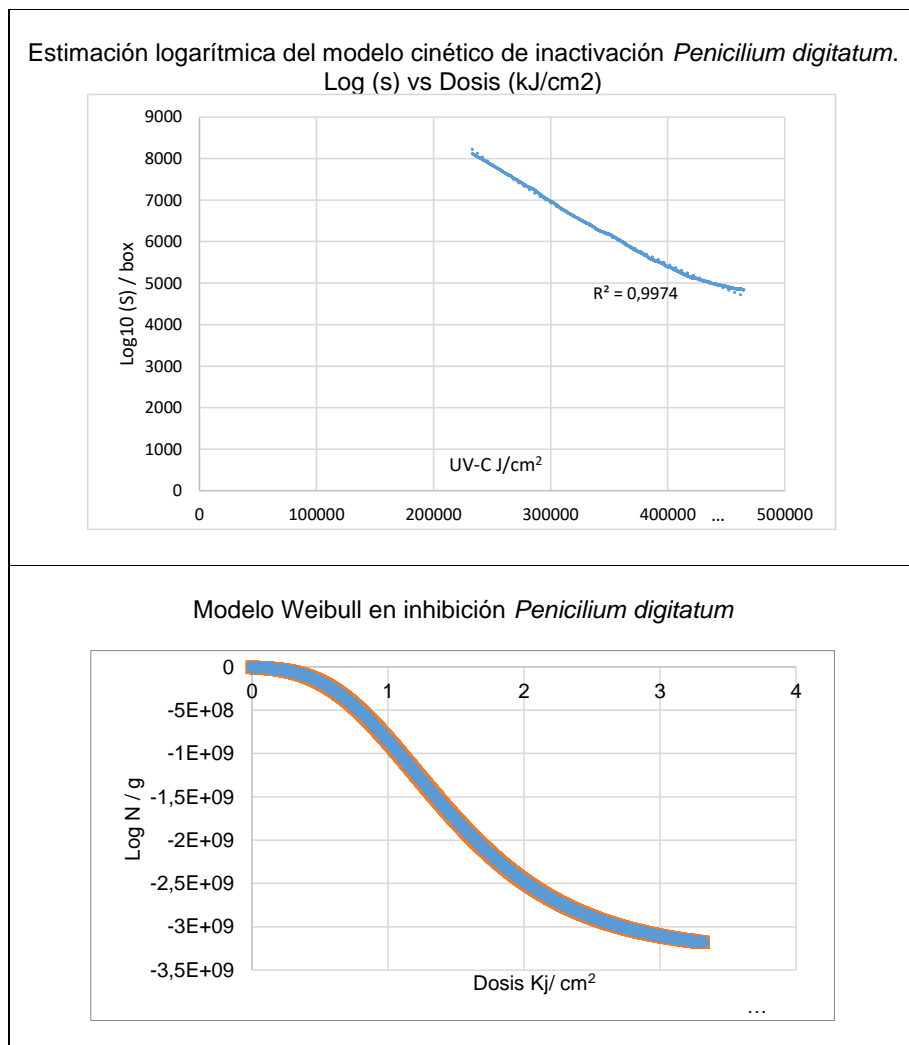


Figura 31. Grafica de cinética de inhibición *Penicilium digitatum*. Log (s) vs Dosis (kJ/cm²). Fuente Autor.

Se obtuvo para *Cladosporium cladosporioides* una eliminación máxima de 3×10^9 UFC / g con dosis de 2.6 kJ/cm² y para *Penicilium digitatum* una eliminación máxima de 2.87×10^9 UFC / g con una dosis de 3.4 kJ/ cm², en el modelo esta radiación se obtuvo en un tiempo de 188 s y 192,6 s respectivamente.

Las ecuaciones que describen las cinéticas de inhibición en una cámara germicida con un sustrato de cáscara de café bajo la influencia de radiación UV de 12 w a una distancia de 30 cm, con ajuste logarítmico son:

$$\text{Cladosporium cladosporioides} = SC \frac{UFC}{g} = -5.117 * 10^{(1t)} + \log_{10} (7.1465)$$

$$\text{Penicilium digitatum} = SP \frac{UFC}{g} = -6.582 * 10^{(1t)} + \log_{10} (8.7455)$$

La aplicación práctica de la radiación UV-C para la descontaminación de frutas se ha visto limitada por la dificultad de aplicar una dosis uniforme a formas complejas como las fresas. En este estudio se investigó la simulación del tratamiento con radiación UV-C para encontrar las condiciones óptimas de tratamiento. Se propuso una configuración igual que Vipavee & Fumihiko, (2016) donde las cascarras al igual que las fresas que ellos estudiaron, se colocaron sobre una película transmisible de UV con fuentes de radiación tanto en la parte superior como inferior. Esta configuración permitió una distribución más uniforme de la dosis de radiación en la superficie de las fresas, mejorando la eficacia del tratamiento.

Otros estudios han explorado diferentes configuraciones para la aplicación de UV-C en fresas. Por ejemplo, López et al., (2017) propusieron un sistema de tratamiento con un transportador de banda y lámparas UV-C dispuestas en forma de arco. Este sistema logró una reducción significativa de microorganismos en las fresas, con una alta eficiencia y uniformidad

Con formato: Sin Resaltar

Al igual que ~~Guerrero & Barbosa, (2004)~~ Guerrero & Barbosa, (2004), la incidencia de dosis menor a 500 kJ/cm² no generan cambio en las propiedades organolépticas en las bayas, la mayoría de los casos, ni el tratamiento UV-C corto (20 s) ni el largo (9 min) tuvieron un impacto evidente en las características sensoriales de las bayas. Las diferencias menores observadas se relacionaron principalmente con la madurez, el color y otras características internas. Las fresas congeladas sometidas a un tratamiento prolongado produjeron algunos sabores extraños (principalmente oxidación, notas metálicas y notas quemadas) y algunos participantes notaron un color ligeramente más oscuro, que superó las diferencias internas entre las muestras.

Con formato: Sin Resaltar

Con formato: Color de fuente: Negro

Con formato: Sin Resaltar

7. Discusiones

Sandoval, Zulma & Augusto, (2007)~~Sandoval, Zulma & Augusto, (2007)~~ mencionan que la forma de los frutos de diversas variedades de café en Colombia es elipsoidal-esférica y no depende del estado de madurez de este. En el resultado de forma de los frutos recolectados es propiamente elipsoidal-esférica, debido a que el largo y ancho no difiere en más del 10 % de más muestras sin importar el estado de madurez. Además, Las propiedades texturales proporcionan mayor información discriminatoria que colorimetría, lo que demuestra que la mejor separación no se trata solo de valores de color también incluye su distribución sobre la superficie del fruto , que además ayuda a determinar principales artefactos (Ramos et al., 2010).

En comparación con (Arocho et al., 2015) la medición y extracción de principales artefactos sobre la muestras no indicó algún tipo de agente patógeno sobre el mismo, la gran mayoría de deformidades del fruto estaban relacionados con el desprendimiento del fruto en la etapa de recolección y que las muestras obtenidas sobre la zona de siembra no cuenta con antecedentes de sucesión de especies patógenas primarios como *Cercospora coffeicola*, *Fusarium solani*, *F. oxysporum*, *Colletotrichum gloeosporioides* y *C dematium*.

La clasificación del estado de madurez de las muestras coincide en un 85% con el reporte clasificador de (Ramos et al., 2010) esto demuestra que la utilización de sensores de equipos móviles es una herramienta eficiente en la determinación de estado de madurez del café. Las muestras se ubicaron en el conjunto A y B (maduro y sobremaduro) con una calidad sensorial buena para la extracción de potenciales polifenoles en la preparación de infusiones (Marín López et al., 2003).

La alta resolución de los sensores logró una buena respuesta al comparador Bayesiano en la determinación de textura y lagunaridad, el contorno de la superficie de las cáscaras lograron un error del 1.42% respecto a la determinación fractal (Sandoval & Prieto, 2009).

Con formato: Color de fuente: Negro

Por otro lado, la simulación del modelo de transferencia de irradiación UV, determino al igual (Vicente et al., 1995) que la influencia de la dosis emitida por factores ambientales de refracción y concentraciones focales de radiación, son importantes en la determinación de distancia de la lampara emisora y que distancias menores a 10 cm puede comprometer la morfología de la materia y sabor de alimentos (Salazar Arias et al., 1988).

(Trivittayasil et al., 2016), propusieron un modelo de radiación basada en el escaneo de figuras en este caso fresas cosechadas para determinar geometría de la misma poder modelarla en Ansys 7.8 y determinar la dosis recibida en la superficie en diferentes posiciones de fresa, para determinar el mayor porcentaje irradiado en cada posición, ellos ubican 9 fresas sobre una película transmisible de UV con fuentes de radiación desde la parte superior e inferior con diferentes disposiciones de lámparas UV en donde encontraron que un modelo de 4 lámparas con una distancia horizontal de 300 mm entre las lámparas producía la distribución de dosis más uniforme, con una intensidad de radiación media de 2.04 W/m^2 . Para esta configuración, el tiempo de tratamiento necesario para lograr una inactivación de registro de *Penicillium digitatum* las UFC fueron de 3 min 46s, respectivamente. Por otro lado, la dosis requerida para lograr una reducción aproximadamente 3.3 log de *Escherichia coli* O157:H7 en superficie manzanas inoculadas fue entre 0.54 a 8.64 kJ/m^2 conseguida con una sola lampara, esto infiere que la reducción del microbiota en alimentos depende de las composición fisicoquímica y estructural del fruto, como de la intensidad aparente del foco UV, que depende de los materiales de fabricación. Las lámparas fluorescentes, las más comunes fuentes de luz UVC, son lámparas que funcionan con mercurio a baja y mediana presión, logrando una radiación con una longitud de onda de 254.7 nm; longitud de onda ideal para lograr una radiación germicida (Giraldo, 2018).

Aunque este estudio no examinó la cantidad de UFC de moho que deben inactivarse para que el tratamiento sea efectivo, otros estudios han demostrado que las dosis entre 0,5 y 4 kJ/m^2 reducen la pudrición natural de la fruta (Trivittayasil et al., 2016).

En comparación con (Menezes et al., 2020) los tratamientos con luz UV-C con diferentes irradiancias (6.5, 13, 21 y 36 W/m²) para la inactivación de ascosporas de *Aspergillus fischeri* y *Paecilomyces niveus* en jugo de manzana clarificado, genero un resultado aproximadamente 5.0 y 6.0 log CFU/UFC/mL de UFC de *P. niveus* y *A. fischeri*, respectivamente, en 30 mL de jugo de manzana clarificado (pH 3,8, 12 ± 0,1°Brix).

La cinética de inactivación de cultivos de moho resistentes a UV-C inoculados en superficies secas de clavo determino que dosis de UV-C en el rango de 0.6 a 12.0 kJ/m² son más eficientes en la erradicación de *Rhizopus oryzae*, *Alternaria tenuissima* y *Aspergillus niger* (López, 2007). Los tiempos de exposición son más reducidos en los resultados de la simulación, debido a que no contempla factores intrínsecos y composición específica del sustrato de cáscara en la determinación de fenoles totales (Cárdenas, 2007).

8. Conclusiones

Se logró obtener un modelo mediante simulación de Montecarlo. Los modelos de inactivación para *Penicillium digitatum* y *Cladosporium cladosporioides* calcularon una eliminación de 4.4 log UFC/g y 6.2 log UFC/g respectivamente con una dosis de radiación UV-C a 253.7 nm de 3.08 W/m^2 en un tiempo estimado de 1.25 min, lo que equivale a una inactivación del 97.9%.

La cinética desarrollada en este estudio tiene aplicaciones relevantes en el campo de la microbiología alimentaria. Permite la creación de modelos simulados de agentes patógenos, con el objetivo de desarrollar técnicas algorítmicas que guíen los estudios de laboratorio basados en las simulaciones; integrar el manejo de grandes conjuntos de datos relacionados con el análisis de imágenes y la predicción de la inhibición de distribuciones pseudoaleatorias; replicar la metodología sobre otros procesos o alimentos de estudios.

El modelo de simulación propuesto abre nuevas posibilidades para la investigación en microbiología alimentaria, permitiendo la aplicación de técnicas de análisis de datos más sofisticadas para la toma de decisiones más precisas y eficientes.

9. Recomendaciones

1. Potencial del estudio y recomendaciones para futuras investigaciones:

- Este trabajo puede servir como referencia para la determinación de parámetros morfológicos en alimentos y la estimación de la dosis de radiación UV necesaria para eliminar agentes patógenos.
- Se recomienda realizar estudios sobre la aplicación de bandas o métodos de agitación en cámaras germicidas UV. Se hipotetiza que estas integraciones mejorarían la inhibición de agentes patógenos con el uso de luz UV cáscara de café.
- Es importante considerar la distribución de la carga másica dentro de la cámara germicida, influenciada por la disposición de los operarios.
- Para futuros estudios, se recomienda utilizar CFD (Computational Fluid Dynamics) para realizar simulaciones continuas de la carga másica y estimar la eficiencia y penetrabilidad.

2. Sensores y análisis de la radiación UV:

- La implementación de sensores precisos para medir la radiación UV-C en varios puntos de la cámara de esterilización permite calcular la intensidad exacta emitida por la fuente.
- Esto facilita la creación de modelos de radiación más precisos en la simulación, así como la realización de análisis estadísticos más confiables.

3. Uso de herramientas de escaneo por infrarrojos:

- las herramientas de escaneo por infrarrojos ofrecen mayor precisión en la modelación 3D y no se ven afectadas por factores de luminosidad o ruido del medio, como sí ocurre con la metodología ADI.

4. Pruebas de laboratorio y análisis complementarios:

- Se recomienda realizar pruebas de laboratorio para determinar el efecto de la radiación UV-C en la oxidación lipídica, la actividad antioxidante y enzimática de la cáscara de café.
- El uso de un espectrofotómetro permitirá obtener datos analíticos más relevantes sobre el coeficiente de absorbancia.
- Las pruebas de incubación, a su vez, facilitarán el establecimiento de cinéticas de inactivación del fenómeno germicida.

5. Caracterización de la micoflora en cáscara de café:

- La caracterización y análisis de la dinámica de colonización de la micoflora en cáscara de café durante los procesos de almacenamiento utilizados en la elaboración de infusiones de té permitirá realizar una mejor estimación de las distribuciones de microorganismos sobre la carga másica de cáscara en la cámara germicida.

10. Bibliografía

- Arocho, L. A., Rodríguez, R. D. P., & Betancourt, C. (2015). Rol patogénico de la micoflora asociada a las manchas de las frutas de café. *Journal of Agriculture of the University of Puerto Rico*, 89(1–2), 85–96. <https://doi.org/10.46429/jaupr.v89i1-2.1072>
- Arquímedes, J., María, S., & Vargas, P. B. (2021). Estudio de factibilidad para la producción de bebida (infusión-té) como alternativa de la actividad cafetera a partir de la cereza del café.
- Modest, M. F. (2003). Radiative heat transfer, 2nd edition. In *Radiative Heat Transfer, 2nd Edition*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-503163-9.X5000-0>
- Begum, M., Hocking, A. D., & Miskelly, D. (2009). Inactivation of food spoilage fungi by ultra violet (UVC) irradiation. *International Journal of Food Microbiology*, 129(1), 74–77. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2008.11.020>
- Koutchma, T. (2009). Advances in ultraviolet light technology for non-thermal processing of liquid foods. *Food and Bioprocess Technology*, 2(2), 138–155. <https://doi.org/10.1007/s11947-008-0178-3>
- Macarena, B. (2022). Exploración de los mecanismos de adaptación y resistencia a radiación UV en microorganismos halófilos extremos.
- Cárdenas, S. I. (2007). Caracterización morfológica y agronómica de café (*Coffea arabica* L.) del CATIE, Programa de Educación Para El Desarrollo t La Conservación, 117.
- Carvajal, J., Aristizábal, I., Oliveros, C., & Mejía, J. (2011). Colorimetría del Fruto de Café (*Coffea arabica* L.) Durante su Desarrollo y Maduración. *Rev.Fac.Nal.Agr.Medellín*, 64(2), 6229–6240.
- Cataldo, V. A., Cavallaro, G., Lazzara, G., Milioto, S., & Parisi, F. (2017). Coffee grounds as filler for pectin: Green composites with competitive performances

dependent on the UV irradiation. *Carbohydrate Polymers*, 170, 198–205.
<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.04.092>

Chalfoun, S. M. (2010). Controle biológico e metabólitos microbianos bioativos: Uma perspectiva da qualidade do café. *Ciencia e Agrotecnologia*, 34(5), 1071–1085.
<https://doi.org/10.1590/S1413-70542010000500001>

Millán, D., Romero, L., Brito, M., & Ramos, A. (2015). Ultraviolet Light : Microbial Inactivation on Fruits. *Saber, Universidad de Oriente*, 27(3), 454–469.
<http://www.redalyc.org/pdf/4277/427743080011.pdf>

Cifuentes Uribe, P. P. (2021). Estudio de mecanismos de reparación del ADN involucrados en la resistencia a la radiación UVB de bacterias antárticas y patagónicas.

Clocchiatti, A., & Catelan, M. (2018). Transferencia radiativa. *Radiación y Materia En Astrofísica*, 27–56. <https://doi.org/10.2307/j.ctt20fw80h.5>

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. *Minerva*, 1(2), 46–53.
<https://doi.org/10.47460/minerva.v1i2.11>

Daniela, P., & Arrieta, H. (2021). Revisión de procesos biológicos para el aprovechamiento de pulpa de café residual.

Elmer Arteaga, A. (2018). Identificación de la diversidad y colonización de Hongos Micorrízicos Arbusculares (HMA) nativos, en el cultivo de café (*Coffea arabica* L.), en cuatro provincias (El Dorado, Lamas, San Martín y Moyobamba) en la región San Martín. Estrategias de Promoción y Notoriedad de Marca de La Empresa Veronika Solar CateringC Company de La Ciudad de Tarapoto Año 2017. Tesis para optar el título profesional de Licenciado en Administración, 1–57.

- Esquivel, P., & Jiménez, V. M. (2012). Functional properties of coffee and coffee by-products. *Food Research International*, 46(2), 488–495. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.05.028>
- Sierra, F., & Salazar, S. (2019). Impacto de las variaciones de las exportaciones del sector cafetero en el empleo durante los últimos 5 años en Colombia. 62.
- Flores Gallegos, E., Olvera González, E., Escalante García, N., Alaniz Lumbreras, D., Ivanov Tsonchev, R., & Lara Herrera, A. (2022). Based UV-A LEDs food disinfection mechatronic system. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 14(2), 33–45. <https://doi.org/10.5154/r.inagbi.2021.10.115>
- Gamboa-Gaitán, M. a. (2006). Hongos Endófitos Tropicales : Conocimiento actual y perspectivas. *Acta Biológica Colombiana*, 11(1), 3–20.
- García, M. (2016). Apuntes para Espectrometría de Radiación Ultravioleta Visible (UVVIS). *Repositorio Universidad Autónoma Del Estado de México*, 1–38.
- Gil Ruiz, I. S., & Deaza Mancera, G. V. (2019). Desarrollo de una bebida refrescante con antioxidantes a base de café verde (*Coffea arábica*) y pulpa de gulupa (*Passiflora edulis* Sims). 13–14.
- Giraldo, S. O. (2018). Implementación de un sistema de radiación ultravioleta como germicida en instrumentos de cocina, para la inactivación de las bacterias *E-coli* y *Staphylococcus Aureus* .
- Gómez Durán, A. M., & Rodríguez, D. S. (2019). plan de negocio para la comercialización de café de origen o especial en la ciudad de bogotá a través de estaciones de servicio móviles. *Society*, 2(1), 1–19.
- Gonzales, I. (2018). Universidad Nacional Mayor de San Marcos Facultad de Ciencias Físicas Escuela Profesional de Física Solución numérica de la ecuación de transferencia de radiación (ETR) en una dimensión.

- González, L., Brito, Ma., & Ramos, A. (2015). Luz ultravioleta: inactivación microbiana en frutas. *SABER. Revista Multidisciplinaria Del Consejo de Investigación de La Universidad de Oriente*, 27(3), 454–469.
- Goyena, R., & Fallis, A. G. (2019). Alternativas de tratamiento del mucilago residual producto del beneficiadero del café. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Guerrero Beltrán, J. A., & Barbosa Cánovas, G. V. (2004). Review: Advantages and limitations on processing foods by UV light. *Food Science and Technology International*, 10(3), 137–147. <https://doi.org/10.1177/1082013204044359>
- Hernández Teyssier, E. L., Anducho Reyes, M. Á., Díaz Godínez, G., & Tellez Jurado, A. (2023). Modelado del crecimiento durante la detoxificación de residuos de café por hongos filamentosos Modeling of growth during detoxification of coffee residues by filamentous fungi. <https://doi.org/10.19136/era.a10nIII.3628>
- Jiménez, J. (2016). Valorización de la pulpa de café mediante la extracción de ácidos hidroxicinámicos y clorogénicos. 42–56.
- Larrondo, L., & Chávez, C. R. (2022). Optimización electrostática de aminoácidos para dimerización de dominios: concepto Magnet aplicado al interruptor optogenético Fungal Light-Oxygen-Voltage.
- Lima, F., Vieira, K., Santos, M., & Mendes de Souza, P. (2018). Effects of Radiation Technologies on Food Nutritional Quality. *Descriptive Food Science*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.80437>
- López, E. (2007). Extracción de aceite de café. *Revista Ingeniería e Investigación*, 27(1), 25–31.
- Macario, V. M. (2014). Cómputo de medidas fractales para imágenes médicas. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Ciencias de La Computación, 1, 85.

Marcia Fuentes, J., Santos Aleman, R., & Montero Fernández, I. (2020a). *Desarrollo de una bebida tipo infusión a partir de pulpa de café (Coffea arabica) variedad Lempira de Honduras*. <https://www.researchgate.net/publication/339016423>

Marín López, S. M., Arcila Pulgarín, J., Montoya Restrepo, E. C., & Oliveros Tascón, C. E. (2003). Relación entre el estado de madurez del fruto del café y las características de beneficio, rendimiento y calidad de la bebida. *Cenicafé*, *54*(4), 297–315.

Marín López, S. M., Arcila Pulgarín, J., Montoya-Restrepo, E. C., & Oliveros-Tascón, C. E. (2003). Cambios Físicos Y Químicos Durante La Maduración del Fruto de Café (*Coffea arabica* L. var. Colombia). *Cenicafé*, *54*(3), 208–225.

Mditshwa, A., Magwaza, L. S., Tesfay, S. Z., & Mbili, N. C. (2017). Effect of ultraviolet irradiation on postharvest quality and composition of tomatoes: a review. *Journal of Food Science and Technology*, *54*(10), 3025–3035. <https://doi.org/10.1007/s13197-017-2802-6>

Menezes, N. M. C., Longhi, D. A., Ortiz, B. O., Junior, A. F., & de Aragão, G. M. F. (2020). Modeling the inactivation of *Aspergillus fischeri* and *Paecilomyces niveus* ascospores in apple juice by different ultraviolet light irradiances. *International Journal of Food Microbiology*, *333*(November 2019), 108773. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2020.108773>

Con formato: Sin Resaltar

Mery Leticia Ramírez Hernández. (2022). *Estrategias de innovación en la creación de nuevos productos a partir de los residuos y subproductos de las industrias alimentarias*.

Millán, D., Romero, L., Brito, M., & Ramos, A. (2015). Ultraviolet Light : Microbial Inactivation on Fruits. *Saber*, Universidad de Oriente, *27*(3), 454–469. <http://www.redalyc.org/pdf/4277/427743080011.pdf>

Muñoz, F. (2014). Distribuciones Poisson y Gamma: Una Discreta y Continua Relación. *Prospectiva*, *12*(1), 99. <https://doi.org/10.15665/rp.v12i1.156>

- Niño Sandoval, Z. L., & Flavio Ortiz, A. P. (2007). Artificial Vision System for Classification of Coffee Beans. *Rev.Fac.Nal.Agr.Medellín*, 60(2), 4105–4127. <http://www.redalyc.org/pdf/1799/179914078015.pdf>
- Niño Sandoval, Zulma, L., & Augusto Prieto, F. O. (2007). Artificial Vision System for Classification of Coffee Beans. *Rev.Fac.Nal.Agr.Medellín*, 60(2), 4105–4127.
- Noriega Salazar, A., Acuña, R. S., & García De Salcedo, M. (2009a). Composición química de la pulpa de café a diferentes tiempos de ensilaje para su uso potencial en la alimentación animal Chemical composition of coffee pulp at different silage times and its potential use in animal feeding (Vol. 27, Issue 2).
- Osorio, V., Pabón, J., Calderón, P. A., & Imbachi, L. C. (2021). Calidad física, sensorial y composición química del café cultivado en el departamento del Huila. *Revista Cenicafé*, 72(2), e72201. <https://doi.org/10.38141/10778/72201>
- Pabón, J., Osorio, V., & Imbachi, L. C. (2021). Calidad física, sensorial y composición química del café cultivado en el Oriente del departamento de Caldas. *Revista Cenicafé*, 72(2), e72202. <https://doi.org/10.38141/10778/72202>
- Paulo Sánchez, J. C., Arias Echandi, M., Armenta Prada, J., & Salas Segura, D. (2012). Luz ultravioleta germicida y control de microorganismos ambientales en hospitales. *Rev Costarr Salud Pública*, 21(1), 19–22. <http://www.scielo.sa.cr/pdf/rcsp/v21n1/art05v21n1.pdf>
- Pereira Galvão, R., Pfenning, L. H., & Antônio De Castro, H. (2005). Characterization and dynamic of colonization of *Cladosporium cladosporioides* (Fresen.) de Vries in coffee fruits (*Coffea arabica* L.). 29(6), 1112–1116.
- Pilicita Garrido, A. E., & Cevallos Duque, D. C. (2019). Innovación tecnológica de un sistema integral para monitorear el consumo eléctrico. *Ingenius*, 22, 9–16. <https://doi.org/10.17163/ings.n22.2019.01>

- Ponomarev, P., Keranen, J., & Pasanen, P. (2016). Electromagnetic transient finite element 3D modelling of electrical machines using open-source tools. *Proceedings - 2016 22nd International Conference on Electrical Machines, ICEM 2016, August 2017*, 1657–1661. <https://doi.org/10.1109/ICELMACH.2016.7732746>
- Proceso, E. N., & Lombricompostaje, D. E. (1999). Caracterización microbiológica y físico-química de la pulpa de café sola y con mucílago (Vol. 50, Issue 1).
- Puerta Quintero, G. I. (2012). Factores, Procesos Y Controles En La Fermentación Del Café. *Avances Técnicos Cenicafé*, 1(422), 1–12.
- Puerta Quintero, G. I., & Ríos Arias, S. (2011). Composición química del mucílago de café, según el tiempo de fermentación y refrigeración. In *Cenicafé* (Vol. 62, Issue 2).
- Quintero Cerón, J., Bohorquez Pérez, Y., & Valenzuela Real, C. (2013). Avances en la aplicación de luz ultravioleta de onda corta (UVC) en frutas y vegetales enteros y mínimamente procesados: revisión. *Tumbaga*, 1(8), 29–60.
- Ramos, P. J., Sanz, J. R., & Oliveros, C. E. (2010). Identificación y clasificación de frutos de café en tiempo real, a través de la medición de color. *Cenicafé*, 61(4), 315–326.
- Ramos Veiga, L., da Silva Boigues, G., Bratífich, R., Pucci Neto, J., & Cardoso Fajoni, F. (2021). Protótipo de uma camara de radiação uv-c para desinfecção de objetos. *colloquium exactarum*, 12(4), 71–81. <https://doi.org/10.5747/ce.2020.v12.n4.e341>
- Restuccia, D., Spizzirri, U. G., Parisi, O. I., Cirillo, G., & Picci, N. (2015). Brewing effect on levels of biogenic amines in different coffee samples as determined by LC-UV. *Food Chemistry*, 175, 143–150. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.11.134>

- Rivera Pastrana, D. M., Gardea Béjar, A. A., Martínez Téllez, M. A., Rivera Domínguez, M., González, & Aguilar, G. A. (2007). Postharvest biochemical effects of UV-C irradiation on fruit and vegetables. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 30(4).
- Rodríguez, J. (2005). Comportamiento fractal del repertorio T específico contra el alérgeno Poa p9. *Revista de La Facultad de Medicina*, 53(2), 72–78.
- Rojas Lemus, M., López Valdez, N., González Villalva, A., Bizarro Nevares, P., Cervantes Valencia, M. E., Casarrubias Tabarez, B., & Fortoul, T. I. (2024). La importancia de evaluar el daño al DNA. *Revista de La Facultad de Medicina*, 67(1), 8–16. <https://doi.org/10.22201/fm.24484865e.2024.67.1.02>
- Ruiz Cruz, S., Garzón García, A. M., Márquez Ríos, E., Dussán Sarria, S., Hleap Zapata, J. I., & Fabián Lobatón, H. (2019). *Computational fluid dynamics as a technique for the UV-C light dose determination in horticultural products*. <http://biotecnia.unison.mx>
- Salazar Arias, J. N., Orozco Castaño, F. J., & Clavijo Porras, J. F. (1988). Características morfológicas, productivas y componentes del rendimiento de dos variedades de café: Colombia y Caturra. In *Cenicafé* (pp. 43–60).
- Salazar Téllez, C. F., Morales Acevedo, W. A., Rojas Contreras, L., & Cajiao Pedraza, A. M. (2022). Prevalencia de hongos filamentosos en granos de café cultivado en norte de Santander, Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 14(1). <https://doi.org/10.22490/21456453.5900>
- Sandoval, Z., & Prieto, F. (2009). Procesamiento de imágenes para la clasificación de café cereza. *Prospectiva*, 7(1), 67–73.
- Serna Jiménez, J. A., Torres Valenzuela, L. S., Martínez Cortínez, K., & Hernández Sandoval, M. C. (2018). Aprovechamiento de la pulpa de café como alternativa de valorización de subproductos. *Revista Ion, Investigación, Optimización y*

Nuevos Procesos En Ingeniería, 31(1), 37–42.
<https://doi.org/10.18273/revion.v31n1-2018006>

Silva, C. F., Batista, L. R., & Schwan, R. F. (2008). Incidence and distribution of filamentous fungi during fermentation, drying and storage of coffee (*Coffea arabica* L.) beans. *Brazilian Journal of Microbiology*, 39(3), 521–526.
<https://doi.org/10.1590/S1517-83822008000300022>

Silva, C. F., Schwan, R. F., Sousa Dias, E., & Wheals, A. E. (2000). Microbial diversity during maturation and natural processing of coffee cherries of *Coffea arabica* in Brazil. *International Journal of Food Microbiology*, 60(2–3), 251–260.
[https://doi.org/10.1016/S0168-1605\(00\)00315-9](https://doi.org/10.1016/S0168-1605(00)00315-9)

Tafurt Cardona, Y., & Marin Morales, M. A. (2014a). Principales mecanismos de reparación de daños en la molécula de adn. *Biosalud*, 13(2), 95–110.

Trivittayasil, V., Tanaka, F., & Uchino, T. (2016). Simulation of UV-C intensity distribution and inactivation of mold spores on strawberries. *Food Science and Technology Research*, 22(2), 185–192. <https://doi.org/10.3136/fstr.22.185>

Valero, A., Begum, M., Leong, S. L., Hocking, A. D., Ramos, A. J., Sanchis, V., & Marín, S. (2007). Effect of germicidal UVC light on fungi isolated from grapes and raisins. *Letters in Applied Microbiology*, 45(3), 238–243.
<https://doi.org/10.1111/j.1472-765X.2007.02175.x>

Vasuja, S., & S, V. K. (2018). Ultra Violet Irradiation and its applications in Food Processing Industries: A Review. *International Journal of Trend in Research and Development*, 5(1), 343–346.

Vazquez Correa, A. (2021). *Innovación tecnológica en los metodos de conservación de alimentos*.

Vicente, M. s., Cadena, C., & Tilca, F. (1995). DISEÑO DE UNA CÁMARA DE ENSAYOS DE RADIACIÓN ULTRAVIOLETA. *Journal of Food System Research*, 2(2), 54–65. https://doi.org/10.5874/jfsr.2.2_54

Peleg, M., & Normand, M. D. (2009). Microbial survival curves: Concepts, mathematical models, and applications. *Food Microbiology*, 26(2), 208-221.

Geeraerd, A. H., Van Impe, J. F., & Debevere, J. M. (2000). Equation for inactivation kinetics of individual microorganisms. *International Journal of Food Microbiology*, 59(1), 185-191.